

**Maîtrise en environnement  
Université de Sherbrooke**

**Vers un Système d'Information Géographique du couvert nival en Estrie**

**Robin Fortier**

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître en environnement (M. env.)**

**Août 2010**

**© Robin Fortier, 2010**

**Département de Géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines**

*I-2441*



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
ISBN: 978-0-494-70758-6  
*Our file* *Notre référence*  
ISBN: 978-0-494-70758-6

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

---

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

  
**Canada**

Composition du jury

Vers un Système d'Information Géographique du couvert nival en Estrie

Robin Fortier

Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Hardy B.Granberg, directeur de recherche (Département de Géomatique appliquée, Université  
de Sherbrooke)

Dong-Chen He, membre du jury (Département de Géomatique appliquée, Université de  
Sherbrooke)

Daniel Germain, membre du jury (Département de géographie, Université du Québec à  
Montréal)



**Robin Fortier, Toward an Information System on snow cover in Eastern Townships,  
M.Sc. Environment, M.Env., University of Sherbrooke, 153 p.**

### **Abstract**

The objective of this research is to develop a system capable of simulating snow depth and snow water equivalent in the Sherbrooke to Mount-Megantic area of Quebec's Eastern Townships using meteorological and digital terrain data as input.

The working hypothesis is that meteorological data may drive a point energy and mass balance snow cover model. The model used was developed by the Hydrologic Research Lab (National Weather Service) which was calibrated for local conditions using field data collected during two winters at several sites on Mount-Megantic. Snow water equivalent and depth are used for calibration and validation of the model. Automated snow sensors were also used to obtain temperature calibration data.

The snow surveys and correction of the air temperature for elevation improves the estimates of snow depth and water equivalent.

The results suggest that data from the Sherbrooke meteorological stations can be used to estimate the snow cover over the area of Eastern Townships. Air temperature extrapolation across the field area is a challenge. However the simulated snow cover conforms generally well with data observed at several stations throughout the region.

**Keywords:** Snow Water Equivalent, Snow Depth, Snow cover, Snow energy and mass balance model.

**Robin Fortier, Vers un Système d'Information Géographique du couvert nival en Estrie, Mémoire de maîtrise en Environnement, Université de Sherbrooke, 153 p.**

## **Résumé**

L'objectif de ce mémoire est de développer un système capable de simuler la profondeur et l'équivalent en eau de la neige pour le secteur de Sherbrooke jusqu'au Mont-Mégantic (Estrie, Québec). Les données météorologiques et numériques de terrain seront utilisées.

L'hypothèse pour ce travail est que les données météorologiques peuvent alimenter un modèle ponctuel de simulation de neige basé sur un bilan de masse et d'énergie. Les simulations ponctuelles peuvent être extrapolées à tous les points du territoire en utilisant la topographie et la végétation. Le modèle a été développé par Hydrologic Research Lab (National Weather Service) et calibré aux conditions locales à l'aide de données de terrain recueillies durant deux hivers sur plusieurs sites du Mont-Mégantic. L'équivalent en eau et la profondeur de la neige sont utilisés pour la calibration et la validation du modèle. Des automates ont été programmés pour prendre les données de température nécessaires à la calibration.

Les corrections de températures d'air et des quantités de précipitations avec élévation donnent de meilleurs résultats de simulation des équivalents en eau et d'épaisseurs de neige. Les résultats suggèrent que les stations météorologiques de l'aéroport et l'Université de Sherbrooke peuvent être utilisées pour estimer la couverture neigeuse de l'Estrie. L'estimation de la température de l'air pour le site d'étude est un défi. Cependant, les simulations correspondent bien aux observations.

Mots-clés :

Couvert de neige, Profondeur de neige, Équivalent en eau de la neige, Modèle de neige par bilan d'énergie

Table des matières

Liste des figures.....viii

Liste des tableaux.....x

Liste des annexes.....xi

Remerciements.....xv

1.Introduction..... 1

    1.1 Problématique .....4

    1.2 Objectifs .....11

    1.3 Hypothèses .....11

    1.4 Site d'étude .....12

2. Méthodologie..... 16

    2.1 Acquisition des données .....16

        2.1.1 Mesures stratigraphiques .....16

        2.2.2 Mesures de profondeurs de neige .....18

        2.2.3 Mesures de températures dans la neige .....19

    2.2 Traitement des données.....20

    2.3 Modèle proposé.....26

3.Analyse des résultats.....34

    3.1 Analyse de la saison hivernale 2006-2007.....34

        3.1.1 Analyse des précipitations pour la saison hivernale 2006-2007.....35

        3.1.2 Analyse des vents à Sherbrooke .....37

        3.1.3 Températures de l'air estimées et réelles aux sites d'études .....37

        3.1.4 Variation de la précipitation en fonction de l'élévation .....42

        3.1.5 Variation du facteur de fonte et du délai de la fonte en fonction de l'élévation .43

        3.1.7 Cartes d'épaisseurs de la neige .....44

    3.2 Analyse de la saison hivernale 2007-2008.....50

        3.2.1 Analyse des précipitations pour la saison hivernale 2007-2008.....51

3.2.2      *Analyse des vents à Sherbrooke* .....52

3.2.3      *Températures de l'air estimées et réelles aux sites d'études* .....52

3.2.4      *Cartes des équivalents en eau de la neige* .....56

3.2.5      *Cartes des épaisseurs de neige* .....56

4. Discussion des résultats .....64

5. Conclusion .....66



Liste des figures

**Figure 1** La région en étude .....13

**Figure 2** Zones d'études sur le Mont Mégantic .....14

**Figure 3** Instruments pour lecture de données .....17

**Figure 4** Activité de terrain (trou à neige) .....17

**Figure 5** Règle à neige .....19

**Figure 6** Capteur de température avec panneau solaire sur le Mont Mégantic.....20

**Figure 7** La méthodologie.....21

**Figure 8** Organigramme du programme informatique.....23

**Figure 9** Précipitations mensuelles à Sherbrooke pour la période hivernale 2006-2007.....36

**Figure 10** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Base pour la période hivernale 2006-2007 .....39

**Figure 11** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Chablis pour la période hivernale 2006-2007 .....40

**Figure 12** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Mégantic pour la période hivernale 2006-2007 .....41

**Figure 13** Précipitation versus élévation pour la période hivernale 2006-2007 .....42

**Figure 14** Facteur Fonte versus élévation pour la période hivernale 2006-2007.....43

**Figure 15** Délai de fonte NFF versus élévation pour la période hivernale 2006-2007.....43

**Figure 16** Épaisseur de neige simulée versus réelle à la Base pour la période hivernale 2006-2007 .....45

**Figure 17** Épaisseur de neige simulée versus réelle à la position Chablis pour la période hivernale 2006-2007 .....46

**Figure 18** Épaisseur de neige simulée versus réelle Mégantic pour la période hivernale 2006-2007 .....47

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 19</b> Épaisseur de neige simulée versus réelle station MDDEP Milan pour la période hivernale 2006-2007 .....   | 48 |
| <b>Figure 21</b> Précipitations mensuelles Sherbrooke pour la période hivernale 2007-2008 .....   | 51 |
| <b>Figure 22</b> Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Base pour la période hivernale 2007-2008 .....     | 53 |
| <b>Figure 23</b> Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Chablis pour la période hivernale 2007-2008 .....  | 54 |
| <b>Figure 24</b> Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Mégantic pour la période hivernale 2007-2008 ..... | 55 |
| <b>Figure 25</b> Épaisseur de neige simulée versus réelle Base pour la période hivernale 2007-2008 .....  | 57 |
| <b>Figure 26</b> Profil densité Base pour la période hivernale 2007-2008 .....  | 58 |
| <b>Figure 27</b> Épaisseur de neige simulée versus réelle Chablis pour la période hivernale 2007-2008 .....   | 59 |
| <b>Figure 28</b> Épaisseur de neige simulée versus réelle Mégantic pour la période hivernale 2007-2008 .....  | 60 |
| <b>Figure 29</b> Épaisseur de neige simulée versus réelle Notre-Dame-des-Bois pour la période hivernale 2007-2008 .....   | 61 |

**Liste des tableaux**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 1.</b> Grille de prises des données .....  | 16 |
| <b>Tableau 2.</b> Sommaire des données météo Sherbrooke pour la période hivernale<br>2006-2007..... | 37 |
| <b>Tableau 3.</b> Sommaire des données météo Sherbrooke hiver 2007-2008.....                        | 52 |

## Liste des annexes

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Annexe 1 : Comparaison des modèles de neige.....</b>   | <b>77</b> |
| <b>Annexe 2 : Identification de 10 modèles de neige participant à Snowmip2 (Rutter et al., 2009)</b>  | <b>78</b> |
| <b>Annexe 3 : Caractéristiques techniques de 10 modèles de neige participant à Snowmip2</b><br><b>(Essery et al, 2005) .....</b>  | <b>79</b> |
| <b>Annexe 4 : Caractéristiques des modèles de neige participant à snowmip1 (Centre National de</b><br><b>Recherche Météorologiques, 2003) .....</b>   | <b>81</b> |
| <b>Annexe 5 : Grille d'altitude pour calcul des indices de pente et de profil terrain .....</b>   | <b>82</b> |
| <b>Annexe 6 : Calcul des indices de profil de terrain pour chaque grille d'altitude (Granberg,</b><br><b>H.B. 1973) .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>Annexe 7 : Calcul des indices de profil de pente pour chaque grille d'altitude .....</b>   | <b>84</b> |
| <b>Annexe 8 : Données des profondeurs de neige aux sites d'étude .....</b>  | <b>85</b> |
| <b>Annexe 9 : Densités moyennes .....</b>   | <b>86</b> |
| <b>Annexe 10 : Prise des données des senseurs.....</b>  | <b>88</b> |
| <b>Annexe 11 : Le Modèle Numérique Altitude .....</b>   | <b>90</b> |
| <b>Annexe 12 : Le Modèle Numérique Végétation .....</b>   | <b>91</b> |
| <b>Annexe 13 : Calcul du ratio de la quantité de précipitation sur un site d'étude donnée par</b><br><b>rapport à celle observée à la station météorologique Environnement Canada de</b><br><b>Sherbrooke pour la période hivernale 2006-2007 .....</b> | <b>92</b> |
| <b>Annexe 14 : Calcul du ratio de la quantité de précipitation sur un site d'étude donnée par</b><br><b>rapport à celle observée à la station météorologique Environnement Canada de</b><br><b>Sherbrooke pour la période hivernale 2007-2008 .....</b> | <b>93</b> |
| <b>Annexe 15 : Cartes des épaisseurs et équivalents eau de la neige sur le territoire pour la</b><br><b>saison hivernale 2006-2007 .....</b>  | <b>94</b> |

## Liste des symboles

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $\delta q$ :               | Chaleur ajoutée ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )  |
| $C_p$ :                    | Capacité chaleur spécifique de l'air ( $\text{cal} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ )   |
| $\delta T$ :               | Changement température de l'air en degré Celcius  |
| $\alpha$ :                 | Volume spécifique ( $\text{m}^3$ )  |
| $\delta P$ :               | Changement pression (kpa)   |
| $Le$ :                     | Chaleur latente (cal)   |
| $\delta w$ :               | Changement vapeur d'eau dans l'air (g)  |
| $T_a \text{ Elev}$ :       | Température de l'air à une élévation ( $^\circ\text{C}$ )   |
| $T_a \text{ Sherbrooke}$ : | Température de l'air Sherbrooke ( $^\circ\text{C}$ )  |
| $Grad$ :                   | Gradient de température entre Sherbrooke et Notre Dame des Bois ( $^\circ\text{C}$ )  |
| $Elev$ :                   | Élévation (m)   |
| $Prec$ :                   | Précipitation (mm eau)  |
| $\rho 1$ :                 | Densité période 1 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  |
| $\rho 2$ :                 | Densité période 2 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  |
| $Fonte$ :                  | Fonte de neige (mm)   |
| $FF$ :                     | Facteur de fonte de neige ( $\text{mm}/(^\circ\text{C} \cdot \text{h})$ )   |
| $NFF$ :                    | Délai de fonte des neiges ( $\text{mm}/(^\circ\text{C} \cdot \text{h})$ )   |
| $T_a$ :                    | Tair ( $^\circ\text{C}$ )   |
| $T_b$ :                    | Tbase ( $^\circ\text{C}$ )  |
| $Fre$ :                    | Facteur de rétention d'eau, $\rho \text{ Eau} (\text{kg}/\text{m}^3) / (\text{cm neige} \cdot \rho \text{ neige} (\text{kg}/\text{m}^3))$ |
| $Q_n$ :                    | Transfert radiatif net ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )   |
| $Q_e$ :                    | Transfert de chaleur latente ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )   |
| $Q_h$ :                    | Transfert de chaleur sensible ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )  |
| $Q_g$ :                    | Transfert de chaleur interface sol-neige ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )   |

|              |   |
|--------------|---|
| $Q_m$ :      | Transfert de chaleur par changement de masse ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )   |
| $\Delta Q$ : | Changement dans la chaleur emmagasinée ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )   |
| $C_i$ :      | Chaleur spécifique de la glace ( $\text{cal} / (\text{mg} \cdot ^\circ\text{K})$ )                                |
| $\rho_s$ :   | Densité solide de la portion de glace dans le couvert neigeux ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )                          |
| $T$ :        | Température de neige ( $^\circ\text{K}$ )   |
| $t$ :        | Temps (s)   |
| $Z$ :        | Distance de l'interface air-neige (cm)  |
| $K_e$ :      | Conductivité thermique effective de la neige ( $\text{cal} / (\text{cm} \cdot ^\circ\text{K} \cdot \text{sec})$ ) |
| $W_s$ :      | Masse de la neige par-dessus la couche (mm eau)   |
| $H$ :        | Coefficient de viscosité (cm/heure)   |
| $h_t$ :      | Coefficient de viscosité à une température $t$ (cm/heure)   |
| $\eta_0$ :   | Coefficient de viscosité à une température de zéro degré C (cm/heure)   |
| $A$ :        | Énergie activation de la neige (cal/mole)   |
| $R$ :        | Constante des gaz ( $\text{cal}/(\text{mole} \cdot \text{K})$ )   |
| $C_1$ :      | Augmentation de densité par cm de charge à zéro degré ( $1/(\text{cm} \cdot \text{h})$ )                          |
| $C_2$ :      | Paramètre de compaction de neige ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )   |
| $V_v$ :      | Vitesse du vent de la Station Sherbrooke pour la période (km/h)   |
| $V_{vm}$ :   | Vitesse du vent de la grille pour la période (km/h)   |
| $U^*$ :      | Vitesse du vent critique pour provoquer transport éolien (km/h)   |
| $U_r$ :      | Vitesse de référence du vent (km/h)   |
| $K$ :        | Constante de Von Karman (0,4)   |
| $Z_o$ :      | Longueur de rugosité de surface de neige (approximation $10^{-1}$ cm)   |
| $Z_r$ :      | Hauteur de référence du vent (10 m)   |
| $P_a$ :      | Densité de l'air  |
| $C_b$ :      | Capacité d'interception des branches des conifères (mm)   |
| $P_g$ :      | Précipitation de neige totale (mm)  |

|         |  |
|---------|--|
| $k$ :   | Facteur reliant l'interception des arbres et la précipitation ( $\text{mm}^{-1}$ ) |
| $P_0$ : | Facteur entre le type d'arbre et l'interception de la précipitation de neige (mm)  |
| $Sb$ :  | Paramètres de végétation (mm)  |
| $P_n$ : | Précipitation nette (mm)   |
| $P_g$ : | Précipitation brute (mm)   |
| $P$ :   | Fraction de couvert végétal  |

**Remerciements**

Il est certainement opportun de remercier les personnes dont les connaissances techniques ont été utilisées pour cette étude : Patrick Cliche, Mariette Lambert, le personnel du parc du Mont-Mégantic et certainement mon directeur de recherche, Hardy Granberg qui m'a fait découvrir divers phénomènes physiques de la neige.



## 1. Introduction

Le manteau blanc hivernal interagit avec les aspects économiques, sociaux et environnementaux. La neige contribue à l'essor économique de diverses manières : alimentation en eau des réservoirs hydroélectriques, procédés industriels et agriculture. Elle permet également l'enneigement des pistes de motoneige et de ski alpin. Ces activités jouissent d'une grande popularité dans les régions nordiques. Le couvert nival modifie la végétation, la faune et interagit avec l'atmosphère et le sol.

La présence du couvert blanc représente une accumulation d'eau dans les bassins versants. Cette eau alimente les réservoirs des barrages hydroélectriques, les industries et les résidences lors de la fonte des neiges. La production d'hydroélectricité génère des profits importants au Québec (Chokmani *et al.*, 2006, De Sève *et al.*, 2007). Le couvert nival représente un intérêt majeur pour les activités humaines en raison de la hausse continue de la consommation d'eau.

La présence de neige affecte également les transports. L'entretien du réseau et les déplacements sont en lien direct avec les conditions hivernales et la présence de neige (McKay *in* Gray and Male, 1981, p.3). D'autres impacts économiques sont le design et l'entretien des infrastructures routières, bâtiments et barrages. Également dans d'autres pays, l'alimentation en eau dépend de la fonte des glaciers (Dyurgerov *et al.*, 1994). Des modifications dans les précipitations, par exemple de la pluie en période hivernale, entraînent une fonte accélérée des neiges et des glaciers, ainsi qu'un ruissellement néfaste non désiré. Les conséquences de tels changements provoquent généralement une disponibilité réduite de l'eau dans des périodes de fortes demandes pour les activités humaines (Dyurgerov, 1985).

Également, l'industrie touristique des sports d'hiver tels la motoneige et le ski alpin dépend de sa présence. Dans un contexte de changements climatiques, toute modification à la présence du couvert nival change le ruissellement et la disponibilité de l'eau. La neige est donc une composante importante dans le cycle hydrologique et également pour le climat. Effectivement, la neige agit comme réflecteur de la radiation solaire. Ceci permet de réduire la température au niveau du sol. L'atmosphère en présence de neige a donc une température réduite.

Les raisons d'étudier le couvert nival sont donc nombreuses et diversifiées, telles que les changements dans le ruissellement et gestion des barrages (Adams *et al.*, 2007), la disponibilité de l'eau, la prédiction de la fonte des glaciers (Bugnion *and* Stone, 2002), le design et l'entretien des infrastructures humaines (Cooley *and* Robertson, 1985), la gestion de la pollution provenant des dépôts de neige et les mesures d'urgence comme les inondations et les avalanches (Carroll *and* Larson, 1981, Turcotte *et al.*, 2004, Schaerer *in* Gray *and* Male, 1981, p.475). Et nous pourrions en ajouter d'autres !

La présence de la neige affecte la faune et la flore. Dans certaines situations extrêmes, elle endommage la végétation et provoque la perte de certaines faunes, alors qu'elle peut la protéger dans d'autres situations (Adams, W.P. *in* Gray *and* Male, 1981, p.14).

Il est donc d'une importance prioritaire d'estimer la quantité de précipitation de neige, la quantité d'eau que représente la neige à la fin de l'hiver et la direction du ruissellement sur l'ensemble du territoire dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des besoins en eau (Huang *and* Cressie, 1996). Cependant, les cristaux de neige se métamorphosent constamment. Des transformations s'opèrent continuellement aux échelles microscopiques et macroscopiques. Chaque cristal se modifie au niveau de sa dimension et de sa forme solide, liquide et gazeuse. De plus, la topographie et la végétation affectent sa présence au sol selon les conditions météorologiques.

Plusieurs études ont été faites pour simuler le manteau de neige, depuis l'arrivée des ordinateurs. Les premières études concernaient principalement le ruissellement suite à la fonte des neiges. Les études actuelles s'intéressent à l'impact de la neige sur le climat. D'autres sphères de modélisation focalisent sur le gel au sol, sur les prévisions d'avalanches, sur l'acquisition des données climatiques et sur l'érosion des sols. Les modèles ne peuvent représenter l'ensemble complexe des interactions dans le manteau à partir de l'échelle microscopique vers l'échelle macroscopique. Cependant, un modèle simple peut représenter les épaisseurs et les équivalents en eau de la neige sur le territoire. Cette étude examine un tel modèle ayant un nombre limité d'entrées : la topographie, la végétation et les conditions météorologiques. Elle vise l'examen comparatif des propriétés de neige durant la période

d'accumulation de neige en quelques lieux de la région en omettant les interactions microscopiques.

La région du Mont-Mégantic reçoit de grandes quantités de neige. Cette neige permet les activités sportives dans la région, ce qui génère une activité économique. Cependant, l'épaisseur de la neige au sol varie d'un secteur à un autre. Le but est de connaître les caractéristiques de la neige pour chacun de ces secteurs. Les données météorologiques de Sherbrooke servent à estimer les conditions météo de chaque point d'étude. Elles sont extrapolées à partir de la topographie et de la végétation.

Les modèles actuels sont complexes et demandent des équipements sophistiqués. L'objectif est de modéliser simplement la progression de l'épaisseur et de la densité de neige pour le territoire de Sherbrooke-Mont-Mégantic pour les deux hivers 2006-2007 et 2007-2008. L'hypothèse principale soutenant cette démarche est que les données de la station météo Sherbrooke peuvent être utilisées sur le territoire Sherbrooke- Mont-Mégantic.

Les bassins versants de la région sont reliés à la quantité de neige sur les Appalaches et le Mont-Mégantic. Les cours d'eau qui alimentent les municipalités en Estrie et le sud du Québec ont comme source les montagnes des Appalaches. Il est intéressant de démontrer qu'un modèle simple permet de déterminer les mêmes propriétés qu'un modèle complexe en utilisant un ordinateur portable.

Le mémoire englobe un cadre théorique et expérimental ainsi qu'une analyse des résultats et une conclusion.

Le cadre théorique consiste à décrire les modèles de neige, à établir la problématique, les objectifs et les hypothèses. Le cadre expérimental vise à décrire le site d'étude, les données prises sur le terrain, les activités de collecte de données pour les deux hivers en étude, la description des équipements et les étapes méthodologiques. Une analyse des résultats et une conclusion terminent ce mémoire.

## 1.1 Problématique

Le manteau blanc peut être considéré comme un ensemble de cristaux de glace jumelé à de la vapeur d'eau et de l'eau liquide. Le manteau se transforme continuellement : gaz à liquide, gaz à solide, liquide à solide, liquide à gaz où vice-versa. Les cristaux de neige subissent des modifications perpétuellement. Ils peuvent croître où décroître selon un ensemble de facteurs (Fierz *and* Lehning, 2001).

L'expansion des cristaux arrive lorsque la vapeur d'eau et l'eau liquide présente dans le couvert nival gèlent. Cette transformation peut se produire lors d'un fort gradient thermique entre les zones de transition air-neige et neige-sol. La vapeur d'eau provenant du sol se déplace vers la surface. Celle-ci se transforme progressivement en eau puis en glace lors de sa montée. Les changements de phases engendrent des modifications aux cristaux.

Également, il peut être observé une pellicule de glace en surface du manteau lors de températures froides. Les changements dimensionnels des cristaux provoquent des modifications des propriétés locales du manteau; augmentation de la densité et perte d'épaisseur de la neige.

Une autre situation se produit lorsque de l'eau liquide pénètre le manteau. Ceci peut se produire en période de pluie ou de fonte des neiges. L'eau génère une transformation des cristaux, qui deviennent liquide et regèlent où pénètre le sol ou ruisselle en surface du sol. Les cristaux s'agglomèrent et peuvent former des lamelles et des morceaux de glace dans le manteau. Le manteau se compacte et se densifie en présence accrue de glace.

Les situations précédentes illustrent des changements microscopiques pouvant survenir dans le manteau sous l'effet de la température de l'air, de l'eau liquide et de la vapeur. Les épaisseurs et les équivalents en eau de la neige changent constamment sous l'effet de la température de l'air et de la présence d'eau liquide. Ces commentaires sur le couvert nival proviennent d'observations lors d'expéditions de terrain et de diverses lectures scientifiques (Anderson, 1976, Goodrich, 1976, Lehning and Bartelt, 2002a, 2002b, 2002c, Colbeck, 1980, 1989a, 1989b).

Cependant, le vent peut aussi provoquer une destruction des cristaux et une compaction. L'air présent est aspiré vers l'extérieur du manteau ce qui provoque un affaissement et une densification locale (Colbeck *et al.*, 1989b).

La conductivité thermique affecte les modifications survenant à l'intérieur. Elle varie selon un ensemble de facteurs, dont l'épaisseur, les propriétés initiales des cristaux et les transformations ayant eu lieu suivant les périodes de déposition ou précipitations.

La radiation peut également interagir avec les cristaux. Une forte radiation en présence d'un air sec et froid peut engendrer une sublimation, c'est-à-dire une transformation des cristaux en vapeur. En présence d'un couvert nival mince, la radiation peut réchauffer le sol et causer une fonte locale.

Une estimation à grande échelle de la couverture blanche découle des problèmes à mesurer correctement les propriétés des cristaux de neige localement (Bloschl, 1999). Les paramètres comme la radiation, la température de l'air, la précipitation, le vent se modifient constamment de manière spatio-temporelle (Dong *et al.*, 2005).

Cette variabilité est d'autant plus grande lorsqu'il s'agit de montagnes forestières. De multiples caractéristiques du terrain et de la végétation affectent la présence de neige au sol et il est donc difficile d'estimer les propriétés de neige dans ces conditions. Les caractéristiques du terrain sont la pente et son orientation, l'élévation, la présence de grandes surfaces d'eau, agricoles ou de ville. Les aspects de la végétation sont le type d'arbre, la densité, la hauteur des arbres (Anderton *et al.*, 2004).

L'orientation de la pente affecte la vitesse des vents, la quantité de précipitation, la radiation solaire. Une orientation face au vent augmente la vitesse des vents et provoque plus de redistribution de la neige. Par contre, une orientation dos au vent provoque généralement plus de dépositions de neige. Les terrains concaves accumulent la neige alors que les terrains convexes ont tendance à la perdre. Également, du point de vue exposition aux radiations

solaires, les terrains ayant des pentes exposées au soleil perdent plus rapidement le couvert nival que ceux qui ne sont pas exposés (Granberg, 1973).

La pente du terrain crée divers effets pouvant augmenter ou diminuer la vitesse des vents et les radiations solaires. Un gain en altitude augmente aussi la quantité de précipitations et il est connu que la montée rapide d'air humide provoque plus de précipitations (ECMWF, 2008, Drogue *et al.*, 2002). La présence de lacs non gelés influence le climat en augmentant la quantité d'humidité dans l'air ce qui alimente en eau les masses d'air et ainsi crée de plus fortes précipitations dans les montagnes voisines. Les secteurs agricoles sont sujets au transport éolien de la neige et aux fontes rapides du couvert nival, car ces secteurs sont très exposés aux radiations solaires (Anderson, 1976).

L'élévation affecte la température de l'air, ce qui a pour conséquence de provoquer plus de précipitations. Une réduction de la température de l'air lors de son ascension crée une sursaturation d'humidité dans le nuage et cause des précipitations. Les précipitations peuvent être sous forme liquide ou solide, dépendant de la température, de la pression, de l'humidité de l'air lors de la descente des cristaux de neige (Libbrecht, 2007, Schemenauer *et al.* in Gray and Male, 1981, p.129). La vitesse de montée de l'air a tendance à s'accélérer lorsqu'entraînée vers les plus hautes altitudes, ce qui peut provoquer une redistribution de la neige au sol ; la neige est transportée des endroits exposés aux vents vers les endroits non-exposés. Il est difficile d'intégrer plusieurs variables représentant la topographie pour la prédiction des propriétés de neige, étant donné la complexité des interactions (Chang *and* Zhaoxing, 2000).

Également, les interactions entre le couvert nival et la végétation sont nombreuses. Selon le type de la végétation, la hauteur et la densité des arbres, la végétation vient interagir avec les facteurs topographiques pour créer divers effets de protection aux facteurs éoliens et radiations solaires. De plus, la végétation intercepte près de la moitié de la précipitation. Cette interception dépend d'un ensemble complexe de facteurs, dont la température de la précipitation, la température de la végétation, le taux de précipitation, la vitesse des vents ainsi que les rafales de vent. La neige ainsi déposée sur les branches peut se transformer en vapeur, fondre, tomber au sol selon les conditions météorologiques (Pomeroy *et al.*, 1998).

La neige sur la végétation affecte aussi l'albédo de la végétation, c'est-à-dire la réflexion de la lumière sur les éléments de la végétation tels que les branches, les troncs et les épines des conifères. Les modifications affectent les échanges énergétiques entre la végétation et la neige au sol. Les connaissances des procédés d'interception de neige et d'évaporation sont limitées en raison de la difficulté de mesurer séparément les effets de déposition, de redistribution et d'évaporation (Lundberg *and* Halldin, 2001).

Il est connu que les techniques actuelles ne mesurent pas avec précision les épaisseurs et les équivalents en eau de la neige sur le territoire en raison de la complexité des interactions à l'intérieur des cristaux (Bloschl, 1999, Fierz *and* Lehning, 2001). Les propriétés du manteau neigeux changent de manière spatio-temporelle selon un ensemble de paramètres (Dong *et al.*, 2005).

Les estimations assimilent un comportement ponctuel à une plus grande surface en intégrant quelques paramètres d'importance selon des observations de terrain.

Plusieurs approches permettent d'estimer les propriétés de la neige sur le territoire en utilisant une combinaison de données : stations météorologiques, capteurs satellitaires dans le visible et les micro-ondes.

L'utilisation de données satellitaires permet de distinguer la présence de neige, pourvu que la densité de la végétation et le couvert nuageux le permettent (Chokmani *et al.*, 2006). Ces capteurs ne peuvent estimer les épaisseurs et les équivalents en eau de la neige, mais peuvent servir à corriger les valeurs obtenues des modèles à l'aide d'estimations de couverture de neige (Shimamura *et al.*, 2006, Dressler *et al.*, 2006).

D'un autre côté, les approches des capteurs micro-ondes sont également utilisées pour estimer les propriétés de la neige. Cette méthode est toujours en développement en raison des difficultés à représenter les propriétés de la neige pour diverses situations telles que la

présence combinée de glace, d'eau et de neige (Tait *et al.*, 2000, Dong *et al.*, 2005, De Sève *et al.*, 2007).

Les modèles de prédiction de neige au sol se réfèrent constamment aux données terrestres pour la validation soit des campagnes de terrain ou des stations météorologiques. Il est donc essentiel d'utiliser ces données dans la mesure où elles sont disponibles. La plupart des modèles terrestres ont comme base commune le bilan de masse et d'énergie à plusieurs points donnés du territoire. Ces approches nécessitent de connaître les flux de convection, de radiation et de conduction dans un premier temps.

Plusieurs possibilités s'offrent pour mesurer ces flux. Par la suite, il est possible d'estimer les propriétés de neige ponctuellement. Puis, diverses méthodes ont été développées pour estimer les propriétés de neige sur l'ensemble du territoire : l'interpolation par krigeage a été reconnue comme une approche adéquate (Tapsoba *et al.*, 2005, Chang and Zhaoxing, 2000). L'approche par filtre Kalman a aussi été reconnue en présence de plusieurs stations météorologiques sur un territoire (Huang and Cressie, 1996).

Les modèles numériques utilisant les données de terrain ont aussi des difficultés à prévoir les quantités de neige au sol. Il existe une incertitude sur les paramètres d'entrées tels que la température, la précipitation, le vent, la radiation et l'humidité. Ceci crée aussi des erreurs d'estimations des processus d'interception par la végétation, la sublimation et la redistribution (Greene *et al.*, 1999, Lundberg and Halldin, 1999, Pomeroy *et al.*, 1998).

Il est donc problématique de représenter l'équivalent en eau et l'épaisseur de neige sur l'ensemble du territoire (Bloschl, 1999). Il est nécessaire d'établir des paramètres de calibration pour quantifier les précipitations et la fonte des neiges. Les paramètres utilisés dans ces modèles permettent d'englober le comportement du couvert nival en un lieu et pour une période donnée. Ils sont complexes et difficiles à interpréter (Gustafsson *et al.*, 2001). La calibration s'avère difficile pour la plupart des processus : interception de précipitations par la végétation, les écoulements des précipitations vers le sol à partir des arbres, le calcul de fonte,



la sublimation, le ruissellement, la rétention, la percolation d'eau et la transmission de vapeur d'eau dans la neige (Annexes 3 et 4).

De plus, les paramètres doivent être adaptés ; un modèle qui a été développé pour une région donnée peut difficilement être appliqué à un autre endroit sans calibration (Essery *et al.*, 1999). Une étude récente compare les résultats d'épaisseurs et équivalents en eau de la neige de 33 modèles terrestres dans des environnements variés. Elle révèle un manque de compréhension des concepts impliqués dans la dynamique du couvert de neige (Essery *et al.*, 2005).

Les résultats obtenus des divers modèles de neige illustrés en Annexe 1 montrent cette difficulté pour la plus récente étude de comparaison des modèles de neige existants (Rutter *et al.*, 2009). Les équivalents en eau de la neige sur le site sont représentés par des points de contrôle et les sorties des modèles de simulation sont des lignes continues. La description des modèles de simulation peut être trouvée en Annexe 3 et 4. Pour une année donnée, on remarque les différences entre les équivalents en eau de neige provenant des modèles de simulation. On remarque des différences entre les sorties des modèles et les points de contrôle.

Bien que certains modèles se rapprochent de la réalité du terrain pour une année et un site d'étude donnés, ils ne sont pas représentatifs de tous les sites et de toutes les années. Chaque site semble obéir à une micro climatologie locale distincte d'une année à une autre. L'imprécision locale des prédictions du couvert nival se répercute sur son extrapolation à d'autres points du territoire (Anderton *et al.*, 2004).

Les modèles ayant la température de l'air comme indice énergétique demandent des paramètres de calibration qui dépendent des caractéristiques physiques du site. Ces paramètres peuvent varier de manière spatio-temporelle. Les approches à bilan énergétique requièrent des estimations de la vitesse des vents, du rayonnement et de la pression atmosphérique (Roberge *et al.*, 1988). Les paramètres sont nombreux : flux thermiques en provenance du sol, écoulement de l'excédent en eau du couvert nival, température de séparation de la précipitation, accumulation de déficit énergétique et facteur de fonte.

Les données provenant des stations météorologiques ne représentent pas sans modifications les autres points du territoire. Le couvert nival en milieu forestier est particulièrement difficile à évaluer. La végétation influence les échanges énergétiques et elle est très variable d'un endroit à un autre. La fonte des neiges s'effectue en fonction de la température de l'air et de l'eau de la pluie. Le regel de l'eau dans le couvert nival demeure difficile à simuler, mais permet d'estimer avec plus de précision le couvert nival (Rutter *et al.*, 2009). Les tentatives de prédiction de couverts de neige et de glace sont imprécises (Fernandes *et Zhaoy*, 2009). Il existe un écart important entre ce qui est observé et ce qui est simulé par diverses techniques. Les ordinateurs ne sont pas en mesure d'intégrer complètement les processus physiques existants et les interactions avec le sol, la végétation et l'atmosphère (Hellstrom, 2009; Kasurak *et al.*, 2009; Ge *et Gong*, 2009).

Devant l'incertitude des données entrantes, il est préférable d'utiliser un modèle simple ayant des paramètres adaptés à un lieu spécifique de manière à performer adéquatement pour représenter le couvert de neige. Un exemple de modèle simple est proposé par l'étude SnowMIP2 (Rutter *et al.*, 2009). Le *Snow-17 (S17)* a été développé par Eric Anderson de Hydrologic Research Lab (National Weather Service). Ce modèle permet de prédire le ruissellement à partir de concepts d'accumulation et de fonte de neige. La température de l'air sert d'indice des échanges d'énergie entre la neige et l'air en milieu forestier. La température de l'air est un indice énergétique adéquat en milieu forestier. Cependant, le modèle (*S17*) sous-estime la fonte du couvert nival lors d'une période froide suivant une fonte et lors d'une période venteuse et un point de rosée supérieur au point de congélation. La fonte est surestimée lorsque la température est chaude et en absence de vent. L'eau transmise au travers des lentilles de glace n'est pas évaluée (Roberge *et al.*, 1988, Anderson, 1973). La température de l'air n'est pas un indice énergétique adéquat en milieu ouvert tel qu'une zone agricole où urbaine. Le modèle *S17* utilise le bilan d'énergie dans ces lieux. La grande variabilité des flux de radiation et de vent crée des erreurs dans les estimations (Anderson, 1976).

## 1.2 Objectifs

L'objectif principal est de caractériser les équivalents en eau et les épaisseurs de neige sur l'ensemble du territoire Estrie. Les objectifs secondaires qui découlent de cet objectif principal sont :

- Simuler à l'aide d'un modèle les épaisseurs et équivalents en eau de la neige pour les sites d'études sur le Mont-Mégantic;
- Comparer l'évolution des épaisseurs et équivalents en eau de la neige provenant des simulations par ordinateur et des données de terrain pour les sites d'études sur le Mont-Mégantic;
- Élaborer spatialement les épaisseurs et équivalents en eau de la neige en considérant la topographie et la végétation;
- Produire les cartes hebdomadaires d'épaisseur et d'équivalent en eau de la neige pour les périodes 2006-2007 et 2007-2008 de la région Sherbrooke-Mont-Mégantic.

## 1.3 Hypothèses

L'hypothèse principale est qu'il est possible d'estimer les paramètres qui alimentent le modèle sur l'ensemble de la région Estrie à partir des données locales disponibles. Les hypothèses qui découlent de cette affirmation sont les suivantes :

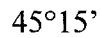
- Les données de la station météorologique de Sherbrooke peuvent être extrapolées à la région de Sherbrooke-Mont-Mégantic en considérant la topographie;
- La température de l'air et la pression atmosphérique de chaque pixel d'élévation peuvent être connues. La vitesse des vents, la radiation ondes courtes et la radiation ondes longues peuvent être estimées à l'intérieur de ce secteur en considérant la topographie;

- Les quantités de précipitations peuvent être établies à l'aide des données de la station météorologique de Sherbrooke et des données d'équivalent en eau de la neige sur le Mont-Mégantic à diverses élévations;
- La fonte peut être estimée en milieu forestier par une équation théorique qui relie les paramètres de fonte à la température de l'air.

#### **1.4 Site d'étude**

La région d'étude (figure 1) se situe entre 71°0' et 71°45' de longitude ouest et entre 45°15' et 45°45' de latitude nord, comprise entre le Mont-Mégantic à l'est et Sherbrooke à l'ouest, la frontière américaine au sud et le Mont-Stoke au nord. La région englobe une mosaïque de zones agricoles, urbaines et montagnes forestières. L'agriculture se pratique entre les villes, principalement situé à l'ouest du site de l'étude et le massif du mont Mégantic, qui lui se localise dans le secteur Est du site. Chaque niveau d'élévation représente un des nombreux microclimats qui y sont présents. Ces microclimats possèdent une végétation caractéristique : forêt de feuillus, de conifères et mixte.

Ce massif a plusieurs montagnes ayant de multiples orientations. Il reçoit les plus grandes quantités de précipitations de la région. L'air chaud et humide qui atteint le massif se condense lors de son ascension vers les plus hautes élévations.



L'altitude du site d'étude varie entre 220 mètres à 1100 mètres d'élévation. L'occupation du territoire est variable : il y a présence de zones urbaines, agricoles et forestières. Les zones urbaines et agricoles sont situées dans le secteur ouest de la zone d'étude et la zone forestière dans le secteur Est. Il y a quelques rivières présentes sur le territoire, mais peu de lacs. Le secteur du Mont-Mégantic regroupe les plus fortes élévations du territoire (figure 2).

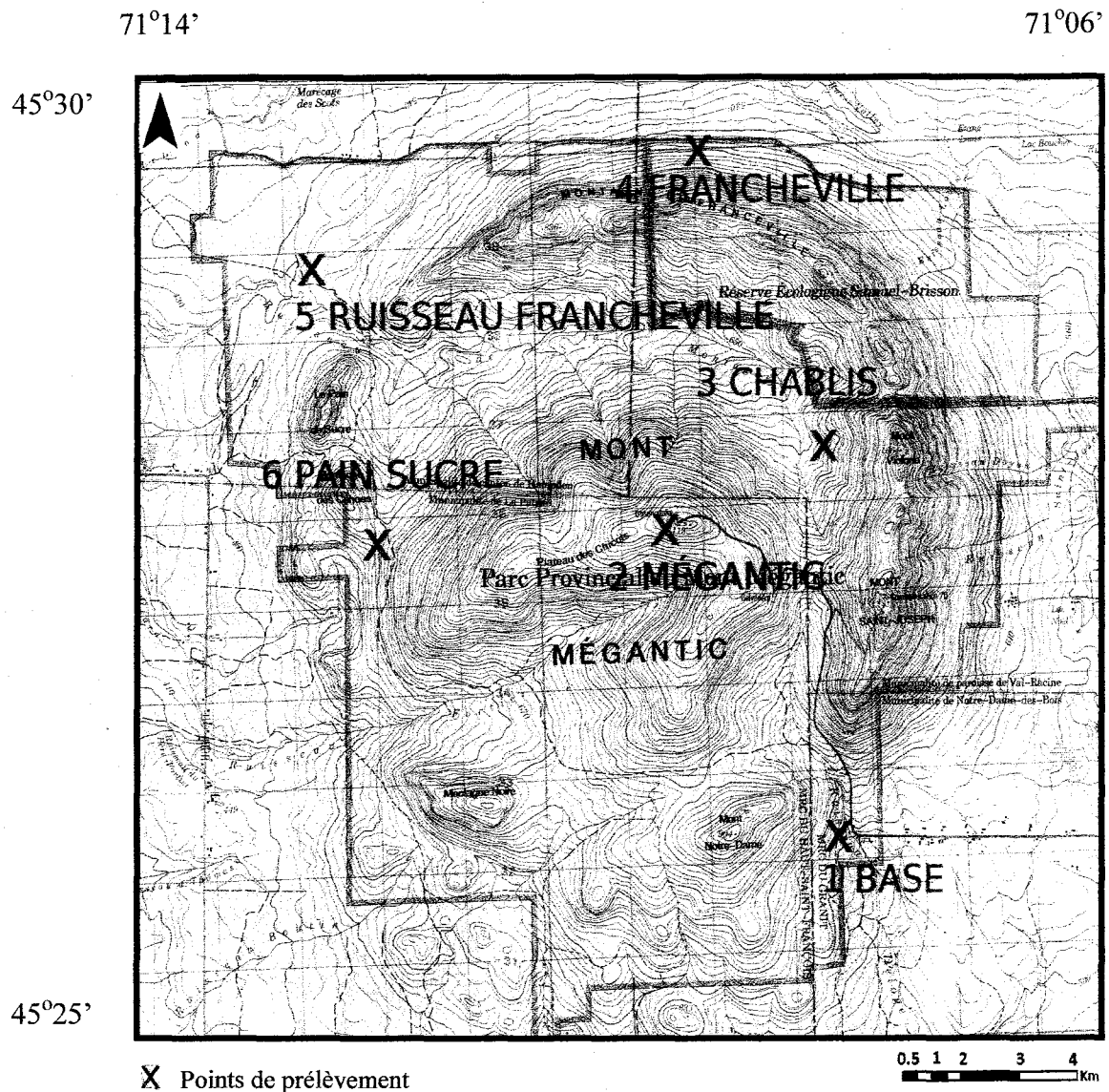


Figure 2 Zones d'études sur le Mont-Mégantic (Ressources Naturelles Canada, 2008)

Le Mont-Mégantic est reconnu pour avoir les plus fortes précipitations (Parc National du Mont-Mégantic, 2008). Divers types de forêt y sont présents : la forêt de feuillus, la forêt mixte et la forêt de conifères. Les stations météorologiques de Sherbrooke utilisées dans cette étude sont : Environnement Canada à l'aéroport de Sherbrooke et Université de Sherbrooke.

Le point 1 représente la Base (figure 1). L'altitude de la base est 610 mètres, l'orientation de la pente est 255 degrés et son inclinaison de 13%. Il est composé d'érables et de bouleaux jaunes.

Le point 2 représente le sommet Mégantic avec une élévation de 1000 mètres. L'orientation de la pente est 60 degrés et son inclinaison de 23%. Il est composé de conifères principalement.

Le point 3 représente le Chablis. Son altitude est de 790 mètres, l'orientation de la pente est de 20 degrés et sa pente de 12 %. La forêt représente un mélange de bétulaies blanches à bouleaux jaunes.

Le point 4 représente Francheville. Situé à une altitude de 550 mètres, l'orientation de sa pente est de zéro degré et sa pente de 18 %. La forêt se compose d'érables et de bouleaux jaunes.

Le point 5 est le ruisseau Francheville avec une élévation de 460 mètres, une pente de 14% et une orientation de pente de 250 degrés. Les sapins, les bouleaux jaunes et les érables occupent cet endroit.

Le point 6 est le Pain de Sucre avec une altitude de 500 mètres, une orientation de pente de 150 degrés et une pente de 22%. Il est situé dans une érablière.

Le point 7 de La Patrie se situe en terrain agricole exposé aux vents et aux radiations (figure 2). La pente et l'orientation de la pente sont négligeables pour cet endroit.

Les stations du ministère Développement durable Environnement et Parc (MDDEP) de Notre-Dame-des-Bois, de Sawyerville, de Lingwick, de Milan, de Saint Camille sont également localisées en milieux ouverts. La pente et son orientation sont négligeables pour ces endroits.

2. Méthodologie

La méthodologie consiste à acquérir les données nécessaires à la calibration et la validation du modèle proposé. Les données recueillies sont : les épaisseurs, les équivalents en eau (densités de neige) et températures aux endroits et périodes spécifiques. Des activités manuelles et des automates préprogrammés permettent la cueillette des données. Le traitement des données permet d'évaluer théoriquement les épaisseurs et équivalents en eau de la neige et de comparer avec les valeurs obtenues sur le terrain.

2.1 Acquisition des données

Le tableau 1 représente les diverses activités de prises de données qui ont été faites sur la montagne durant les périodes hivernales 2006-2007 et 2007-2008.

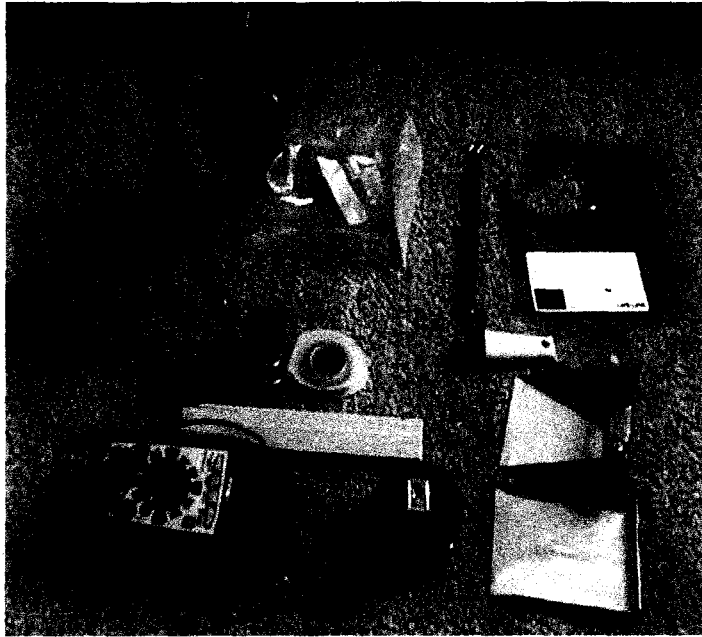
Tableau 1 : Grille de prises des données

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Épaisseurs de la neige | Toutes les positions            |
| Températures de l'air  | BASE/MÉGANTIC/CHABLIS/LA PATRIE |
| Densités de la neige   | BASE/MÉGANTIC/CHABLIS/LA PATRIE |

2.1.1 Mesures stratigraphiques

L'instrument de la prise d'échantillons de neige est illustré à la figure 3 en bas à droite. Les autres équipements illustrés à la figure 3 sont : en haut à droite, petite balance pour peser la neige cueillie par l'échantillonneur ; en bas à gauche, voltmètre pour vérifier la charge des piles des senseurs à neige ; en haut à gauche, caméra numérique pour prises de photos des cristaux de neige. La loupe a servi à l'identification des cristaux et le filtre rouge à améliorer le contraste des photos. Le gallon à étalonnage a été utilisé pour mesurer la distance du sol des prélèvements de neige.





**Figure 3 Instruments pour lecture de données**

La figure 4 illustre les activités sur le terrain qui sont décrites à la section suivante.



**Figure 4 Activité de terrain (trou à neige)**

### 2.2.2 *Mesures de profondeurs de neige*

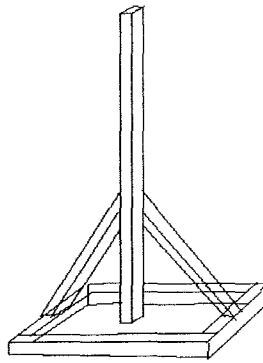
La lecture des épaisseurs de neige a été prise pour tous les secteurs d'étude à chaque période de deux semaines débutant en novembre pour se terminer en mai.

L'étude stratigraphique de la neige a été faite à trois endroits sur la montagne (tableau 1). Les endroits à étudier avaient des pentes nulles ou faibles. Les données de profondeur de neige sont résumées en Annexe 8.

Les coupes de neige ont été faites avec une pelle de métal de manière à obtenir une paroi verticale. Les propriétés de neige ont été étudiées de l'interface air-neige jusqu'au sol par tranche de 15 cm environ. Les propriétés étudiées ont été la dureté manuelle, la densité et la classification des cristaux. La densité de neige a été évaluée avec un cylindre de 0.5 litre (diamètre 0.06 m et hauteur 0.18 m). Les échantillons ont été cueillis dans un sac et pesés sur une balance à ressort (capacité 300 g). La présence de multiples lamelles de glace ou morceaux de glace a rendu difficile l'évaluation de la densité des couches de neige surtout durant la saison 2007-2008. Les résultats de densités sont en Annexe 9.

L'identification des cristaux a été faite à la loupe d'un grossissement de 10 fois. Des photos ont été prises sur la grille millimétrique durant la saison 2006-2007. Les photos n'ont pas été retenues pour déterminer la grosseur des grains par manque de clarté et de précision.

Les mesures de profondeurs de neige de tous les points de la figure 2 ont été faites avec les règles à neige. Cinq règles à neige distante de 5 mètres ont été utilisées pour mesurer la profondeur de la neige (figure 5).



**Figure 5 Règle à neige**

### *2.2.3 Mesures de températures dans la neige*

Le senseur a été inventé et fabriqué par Hardy Granberg et Patrick Cliche du Cartel de l'Université de Sherbrooke (Granberg *et al.*, 2009). Il consiste en une tige de 120 cm de long constituée de 61 thermocouples distants de 2 cm sur la tige. Un panneau solaire recharge la batterie 12 volts et alimente le système. Un microprocesseur intègre les données de température des thermocouples dans la mémoire. La programmation peut être faite pour cueillir les données à des intervalles de temps. La température de l'air a été prise à l'aide de senseurs comme celui illustré à la figure 6.



**Figure 6** Senseur de température avec panneau solaire sur le Mont Mégantic

## **2.2 Traitement des données**

Le traitement des données consiste à effectuer les tâches illustrées à la figure 7.

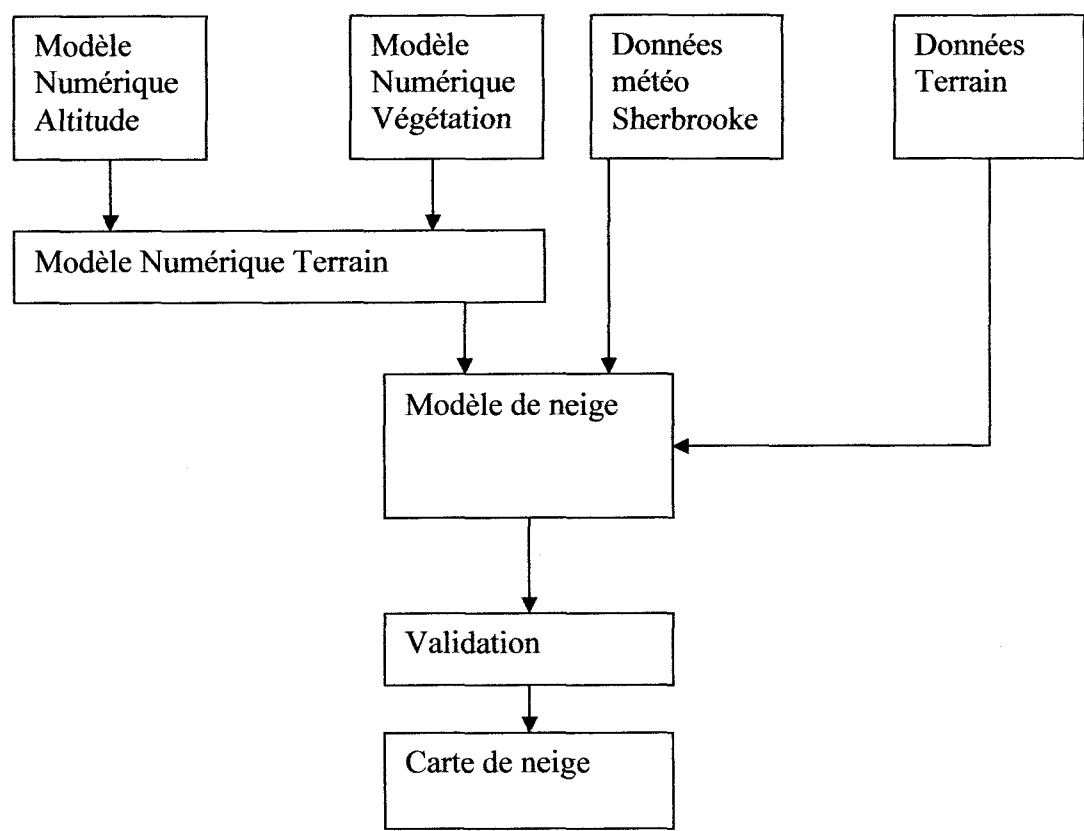


Figure 7 La méthodologie

La première étape est la préparation des données d’élévation, de végétation et de météorologie. Les données numériques d’élévation du Canada, niveau 1 (DNEC1), représentent un quadrillage d’élévations du terrain à intervalles réguliers. Les fichiers matriciels sont basés sur les fichiers numériques de la base nationale des données topographiques (BNDT) à l’échelle 1/50000. La grille matricielle est 1201 rangées par 1201 colonnes. Les résolutions latitude et longitude sont de 0,75 seconde décimale et la résolution en altitude est de 1 mètre.

Le DNEC1 utilise le système de référence nord-américaine NAD83 (Centre Information Topographique, 2003). Le DNEC1 est représenté en Annexe 11.

Les données de végétation consistent à une classification de chaque grille de territoire en forêt d'arbres feuillus, de conifères, de feuillus et conifères et d'espace sans arbres (Système Information éco forestier, 2003). Elles sont découpées aux mêmes dimensions (30 m par 30 m) et positionnements que les grilles du DNEC1 à l'aide du logiciel ArcGIS (Annexe 12). La justification de la résolution spatiale de 30 mètres par 30 mètres provient de l'image satellitaire Landsat. La résolution spatiale utilisée permet d'estimer les propriétés de neige sur le territoire (Liston *and* Sturm, 1998).

Les données météorologiques des hivers 2006-2007 et 2007-2008 proviennent de la station météorologique Environnement Canada de Sherbrooke. Les données disponibles sont la température de l'air, le point de rosée, la pression atmosphérique, la vitesse des vents, la direction des vents, la quantité et le type de précipitation. La résolution temporelle d'une heure est adéquate pour les simulations (Anderson, 1973).

Les données de radiation ondes longues et ondes courtes entrantes proviennent de la station de recherche à l'Université de Sherbrooke (SIRENE). Le jumelage des données de SIRENE et d'Environnement Canada se fait sur une fréquence commune d'une heure. La résolution temporelle d'une heure est utilisée fréquemment dans les modèles hydrologiques et correspond à ce qui est utilisé dans les stations météorologiques d'Environnement Canada. Le traitement des données dans le modèle de neige est illustré à la figure 8.

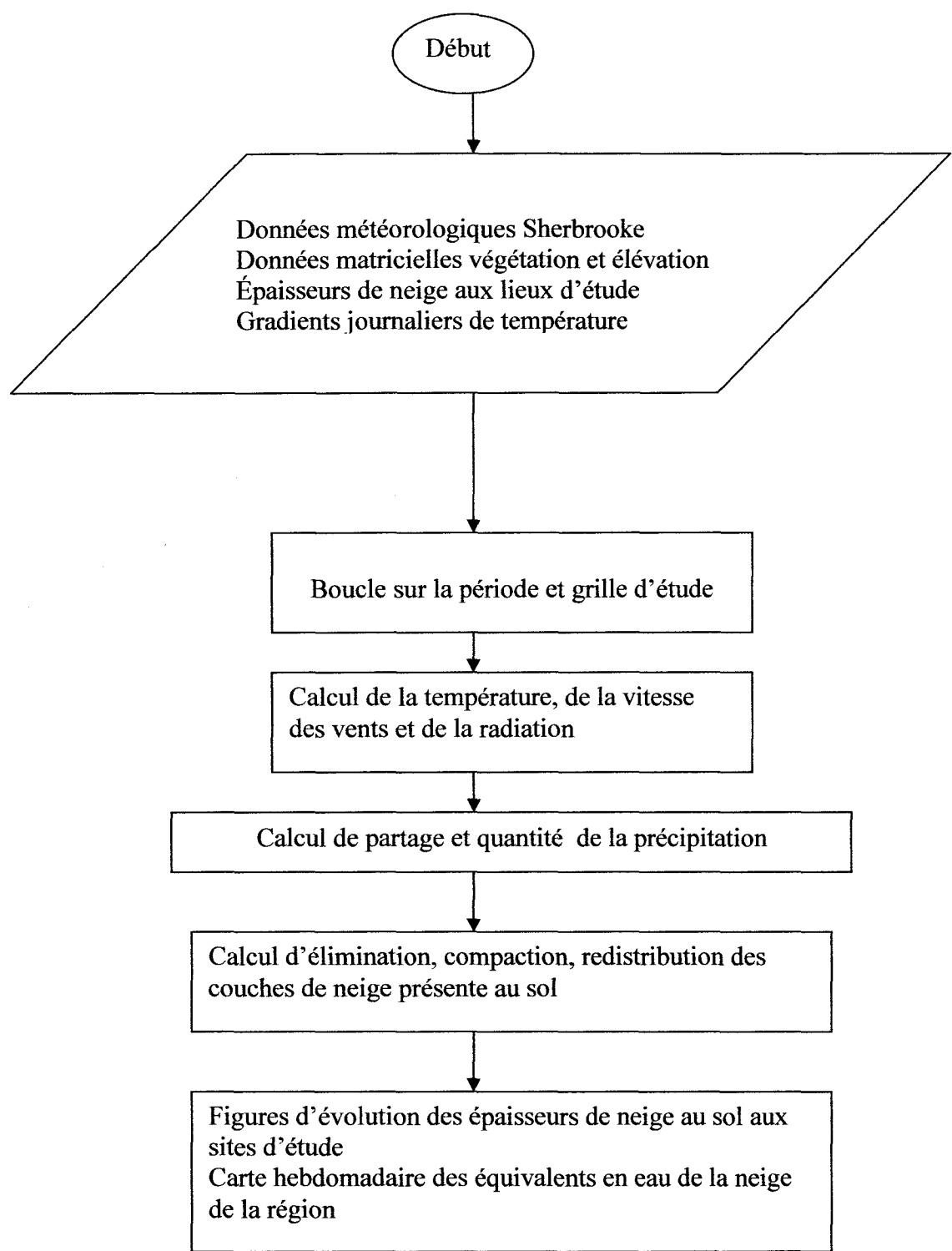


Figure 8 Organigramme du programme informatique

La base de données météorologique a été créée dans un fichier matriciel à partir des données d'Environnement Canada de Sherbrooke et de la station SIRENE. Chaque ligne représente une période et chaque colonne une donnée: la température de l'air, le point de rosée, la pression atmosphérique, la radiation ondes courtes entrantes, ondes longues entrantes, l'albédo et la précipitation de Sherbrooke.

La base de données des gradients de températures journalières correspond à un vecteur dans lequel chaque cellule a un gradient de température entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois.

Dans un deuxième temps, le DNEC1 et les données de végétation sont bâtis sous forme matricielle. Les lignes de la matrice correspondent aux coordonnées longitudes et les colonnes, aux coordonnées latitudes. Le programme lit également les données d'épaisseurs de neige réelles sur le terrain. Chaque colonne représente une position particulière. Chaque ligne représente une période de la saison hivernale 2006-2007 ou 2007-2008.

Ensuite les paramètres de compaction du manteau neigeux sont déterminés en optimisant les paramètres C1 et C2 à partir des données réelles de densités et de températures dans la neige.

Le programme effectue une carte représentant les équivalents en eau de la neige du site d'étude. Également, le programme peut imprimer le suivi des épaisseurs de neige simulées versus réelles sur la période d'étude pour un lieu donné. Dans ce cas, la position d'échantillonnage doit être précisée.

La première étape du traitement des données est le calcul de la température pour la position choisie. Ceci est effectué à partir de l'écart de température entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois.

La deuxième étape du traitement, c'est, lorsqu'il y a précipitation, d'évaluer si la précipitation tombe sous forme de pluie ou de neige.



La troisième étape est de calculer la fonte du couvert nival dans les situations de pluie et de températures supérieures à zéro degré. Pour un milieu avec végétation, la fonte par la pluie se fait à l'aide du bilan d'énergie et la fonte par température supérieure à zéro degré est établie à l'aide de l'équation de l'index de température (équation 10). Dans les cas de milieux sans végétation, la fonte, dans les deux cas, se fait par bilan énergétique (équation 11).

La quatrième étape du traitement est l'ajustement des couches de neige. La couche de neige de la période correspond à la précipitation de neige de la période à laquelle est soustraite la fonte. Lorsque cette couche est inférieure à zéro, le processus d'élimination des couches antérieures à la période d'étude permet de réajuster les couches de neige de toutes les périodes.

La cinquième étape tient compte de la métamorphose de chaque précipitation de neige, dont l'ensemble donne l'épaisseur totale du couvert nival.

La sixième étape est l'impression de la carte des équivalents en eau de la neige sur le territoire où le suivi des épaisseurs de neige réelles et simulées pour un lieu.

Les paramètres de la quantité de précipitation, du facteur de fonte, du délai de la fonte versus élévation proviennent des données de l'hiver 2006-2007.

### 2.3 Modèle proposé

Le modèle consiste en une suite d'énoncés informatiques représentant successivement la température de l'air, la radiation solaire, le vent, le type et la quantité de précipitation, le transport de la neige par le vent, la fonte, la compaction, le calcul d'épaisseur totale et la comparaison des données simulées et réelles. Le modèle utilise des relations linéaires simples entre l'élévation et la température, la quantité de précipitations et la fonte des neiges. Également, le modèle estime la radiation et le vent à partir d'indices de terrain, la concavité et la convexité du lieu.

L'approche repose sur le modèle *Snow-17* (S17) (Anderson, 1973). Le modèle utilise la température de l'air comme indice énergétique en milieu forestier et l'ensemble des flux (radiation et vent) en milieux ouverts. Cette approche a été vérifiée avec succès dans quelques études Québécoises (Bennis et Brunelle, 1989, Prévost *et al.*, 1989, Roberge *et al.*, 1988) et dans deux vastes études de comparaison (Centre National de Recherche Météorologiques, 2003, Essery *et al.*, 2005, Rutter *et al.*, 2009). Le modèle S17 est à la base du système actuel de prédictions hydrologiques au National Weather Service (Dressler *et al.*, 2006).

Les calculs issus du modèle sont basés sur les précipitations et la température de l'air, dans un lieu donné, pour chaque période d'une heure. Dans un milieu forestier, il est reconnu que le rayonnement infrarouge est dominant à l'interface air-neige et que la température de l'air est fortement liée au rayonnement infrarouge, alors qu'un bilan énergétique complet est nécessaire en milieux ouverts (Roberge *et al.*, 1988). Il est donc nécessaire d'estimer la température de l'air pour chaque période en milieux forestiers. De plus, il est connu que la température ainsi que la quantité des précipitations sont liées à l'élévation du point (Chang and Zhaoxing, 2000).

La température de l'air pour le site d'étude est estimée comme suit : un gradient de température journalier moyen est établi entre Sherbrooke (Altitude 241 m) et Notre-Dame-des-Bois (Altitude 502 m) ; la température journalière moyenne est connue pour les deux

endroits et la différence d'élévation également ; la température de l'air à chaque heure et au point d'élévation est établie à l'aide de ce gradient journalier moyen en utilisant l'équation 1.

$$Ta_{Elev} = Ta_{Sherbrooke} + Grad * Elev \quad (1)$$

$Ta_{Elev}$  est la température de l'air à l'élévation;  $Ta_{Sherbrooke}$ , la température de l'air à Sherbrooke;  $Grad$  est le gradient de température entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et  $Elev$  est l'élévation du point considéré.

La température de l'air permet de partager la précipitation solide et liquide. Effectivement, il est considéré comme une précipitation sous forme de pluie lorsque la température est supérieure à zéro degré et sous forme de neige dans les autres situations.

La quantité de précipitations varie avec l'élévation sur le territoire. Elle se calcule à chaque élévation du territoire à l'aide des données de densités de neige cueillies sur le terrain. La densité de la neige est mesurée sur le terrain à chaque point d'étude. Cette densité est convertie en précipitation de neige avec l'équation 2. Effectivement, il est reconnu que la densité de la nouvelle neige est environ  $100 \text{ kg/m}^3$  ; cette valeur a été confirmée lors des travaux de terrain.

$$Prec = (\rho_2 - \rho_1) / 100 \quad (2)$$

$Prec$  est la précipitation de neige,  $\rho_2$  la densité de neige à une période 2 et  $\rho_1$  pour la période 1.

La quantité de précipitation de chaque point d'étude versus Sherbrooke est obtenue en divisant l'équation 2 par la quantité de cm de Sherbrooke.

La quantité de précipitation est estimée pour chaque élévation entre Sherbrooke et les points d'étude à l'aide des données mesurées (Annexe 9) et de la relation linéaire élévation-quantité de précipitation. En connaissant le partage des précipitations et la quantité de précipitation de

chaque élévation versus Sherbrooke, il est possible de connaître les précipitations en tout point du territoire.

Il est possible que la précipitation de neige soit transportée d'un lieu à un autre. Les processus d'interception de la neige par les arbres, la sublimation et le transport éolien sont importants.

La première étape est de calculer la vitesse du vent sur chaque grille du territoire à partir des indices d'exposition (Annexe 5). La vitesse des vents de chaque grille de territoire est connue en multipliant l'indice d'exposition du vent par la vitesse du vent de Sherbrooke.

Les indices considèrent que l'exposition aux vents dominants (ouest) est censée augmenter avec l'altitude, la pente et les zones convexes, mais diminuer avec les zones concaves. Les indices d'altitude, de pente et d'orientation à l'ouest, la différence d'élévation face au vent dominant de l'ouest et la différence entre la grille et le terrain, ont déjà été développés (Granberg, 1973). Pour considérer l'influence de chaque facteur sur la vitesse des vents, il faut les multiplier. L'indice de l'exposition au vent se situe entre 0 et 1,3 pour une altitude inférieure à 2000 mètres (Garen *and* Marks, 2005).

Le calcul des indices de terrain et de pente est décrit dans les Annexes 5, 6 et 7.

La vitesse du vent de chaque grille est calculée selon l'équation 3 en utilisant les indices du terrain  $XB$ ,  $XC$ ,  $XD$  et  $XE$  (Annexes 5, 6 et 7). OE signifie une orientation Ouest-Est.

$$V_{vm} = V_v * XB_{OE} * XC_{OE} * XD_{OE} * XE_{OE} / 1000 \quad (3)$$

La Vitesse du vent critique ( $U^*$ ) provoquant un transport éolien de la neige est calculée à l'aide d'itérations et des équations 4 et 5 (Liston *et al.*, 1998).

$$U^* = U_r * K / (\ln (Z_r/Z_o)) \quad (4)$$

$$Z_o = 0.12 * U^{*2} / (2 * g) \quad (5)$$

L'équation 6 est utilisée pour calculer le retrait ou le dépôt de neige par le vent. Ces situations se produisent lors de précipitations de neige.

Le retrait se produit lorsque la vitesse critique du vent  $U^*$  est supérieure à 0.25 m/s. À l'inverse, le dépôt se fait lorsque  $U^*$  est inférieure à 0.25 m/s. La densité de l'air est calculée à partir de la température de l'air ( $T$ ) et la pression atmosphérique ( $PA$ ) de l'équation 7 (Liston *et al.*, 1998).

$$Qs\_max = 0.68/U^* (\rho a/g) 0.25 (U^{*2} - (0.25)^2) \quad (6)$$

$$\rho a = .010 * PA / (287 * T) \quad (7)$$

Également, la précipitation de pluie ou de neige est interceptée par la canopée. Ces processus ne peuvent être traités dans le cadre de cette étude en raison de l'absence de données suffisantes. Les équations 8 et 9 illustrent la complexité des procédés d'interception.

Une étude antérieure permet de relier l'interception de la neige par les branches des conifères à la précipitation totale à l'aide de l'équation 8 (Lundberg *and* Halldin, 2001):

$$Cb = Sb / (1 + e^{-k(Pg - Po)}) \quad (8)$$

Les paramètres  $Sb$ ,  $Po$  et  $k$  de l'équation 8 sont optimisés à partir des données de terrain en connaissant  $Cb$  et  $Pg$ . L'emménagement de la canopée ( $Cb$ ) doit être estimé pour chaque type d'arbre et pour chaque lieu.

Les taux d'évaporation peuvent être estimés par l'équation 9 :

$$Pn = Pg * (1 - 0.37 P) \quad (9)$$

Le paramètre  $P$  représente la densité du couvert végétal. Il doit être estimé à partir des données existantes pour chaque lieu à l'aide de photographies hémisphériques. La calibration des équations 8 et 9 déborde le cadre de cette étude.

Le calcul de la fonte des neiges se fait différemment en milieu forestier, comparativement à une aire ouverte (urbaine, agricole). En forêt, la fonte débute lorsque la température de l'air est supérieure à zéro où que la pluie tombe sur le couvert nival. En aire ouverte, le bilan d'énergie est utilisé pour estimer la fonte des neiges. L'énergie s'accumule dans le couvert nival à partir de la première couche en contact avec l'atmosphère. Le gain énergétique dans le manteau de neige fait fondre progressivement les couches en débutant par celle en contact avec l'atmosphère. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'énergie soit insuffisante pour la fonte.

La fonte des neiges (Fonte) est estimée pour deux scénarios possibles. L'équation 10 est utilisée pour le milieu forestier.

$$Fonte = (FF - NFF) * (T_{air} - T_{base}) * Fre \quad (10)$$

Le symbole  $FF$  signifie facteur de fonte. Le symbole  $NFF$  signifie le délai de la fonte.  $T_{air}$  représente la température de l'air,  $T_{base}$  la température à la surface de la neige (0 degré Celcius). Les relations linéaires entre les paramètres de fonte ( $FF$  et  $NFF$ ) et l'élévation ont été calculées avec les données de l'hiver 2006-2007.

Pour les milieux sans végétation, la fonte à l'interface neige-air se produit par les échanges énergétiques du vent et de la radiation (équation 11) (Anderson, 1976).

$$Q_n + Q_e + Q_h + Q_g + Q_m = \Delta Q \quad (11)$$

$Q_n$  est le transfert radiatif net ;  $Q_e$ , le transfert de la chaleur latente ;  $Q_h$ , le transfert de la chaleur sensible ;  $Q_g$ , le transfert de la chaleur interface sol-neige ;  $Q_m$ , le transfert de la chaleur par changement de masse et  $\Delta Q$ , le changement dans la chaleur emmagasinée.

La vitesse des vents, qui a déjà été calculée précédemment pour le transport de la neige, (équation 3) est également utilisée dans  $Q_e$  et  $Q_h$  de l'équation 11. Les indices de radiation ondes courtes et longues sont estimés pour chaque grille de terrain.

Un terrain ayant une pente orientée vers le sud reçoit plus de radiations d'ondes courtes. De manière similaire, une pente orientée face aux vents dominants est censée recevoir des vents plus constants et forts. Une zone dans l'ombre aura plus de radiation d'ondes longues. Par exemple, la radiation d'ondes longues sera plus grande dans une zone concave, car l'ombrage est plus important. En découpant le terrain à étudier en plusieurs grilles de 30 mètres par 30 mètres, il est possible de calculer l'exposition au vent et la radiation du territoire (Winstral *and* Marks, 2002).

Une autre situation où le bilan d'énergie s'applique est la fonte de couvert nival par la pluie. Une précipitation liquide s'accumule dans le couvert nival. Une fois arrivée à saturation, l'eau s'écoule dans le couvert nival et transforme les cristaux de neige sur son parcours. Ensuite, elle perd progressivement son énergie et il peut se produire une transformation d'un état liquide à solide.

La radiation d'ondes courtes entrante est calculée en considérant que les facteurs qui l'affectent sont une pente avec orientation au sud et la présence de végétation. Le facteur de radiation d'ondes courtes total est la multiplication des deux facteurs. La radiation d'ondes courtes entrante varie entre zéro et la valeur maximale mesurée en terrain ouvert à la station universitaire.

La réflexion de la radiation (albédo) doit être connue pour calculer la radiation nette qui pénètre dans la neige. Une relation permet de lier la taille des grains, la densité des couches de neige présentes sur les points d'étude et l'albédo de la neige. Une neige propre et sèche a un albédo de 90 %, une neige propre mouillée ou en granules mouillés, un albédo de 60 % et une neige sale, un albédo de 30 % (Gray *and* Male *in* Gray *and* Male, 1981, p. 379).

La radiation d'ondes longues est estimée par la présence de conifères et la concavité du terrain. La valeur minimale provient de la mesure en milieu ouvert de l'Université Sherbrooke, alors que la valeur maximale provient de la relation entre la pression vapeur et la température de l'air (Gray and Male in Gray and Male, 1981, p. 383).

Une autre étape est l'estimation des processus de transformation du couvert nival. Les couches de neige en profondeur, n'ayant pas de contact avec l'atmosphère, sont soumises aux processus d'échange d'énergie par conduction, décrits par l'équation de Fourier (équation 12) (Anderson, 1976).

$$C_i * \rho_s * \partial T / \partial t = K_e * \partial^2 T / \partial z^2 \quad (12)$$

$C_i$  : capacité chaleur spécifique ;

$\rho_s$  : densité ;

$\partial T / \partial t$  : gradient température par rapport au temps ;

$K_e$  : conductivité thermique ;

$\partial^2 T / \partial z^2$  : variation de la température avec la profondeur ;

Une transformation interne du manteau de neige s'effectue. Cette modification interne de la neige se nomme métamorphisme ou modification des cristaux de neige. Les changements des cristaux engendrent des changements de propriétés des couches de neige comme la densité, car le manteau se compacte sous l'effet de paramètres comme la température, le temps et le tassement des couches de neige par le poids (Colbeck *et al.*, 1980, 1989a, 1989b).

Les cristaux subissent un métamorphisme et se compactent. Chaque précipitation d'une heure où couche de neige augmente en densité et diminue en épaisseur. L'équation de Kojima (équation 13) (Anderson, 1976) quantifie ce processus.

La compaction des couches de neige se calcule avec l'équation 13.

$$1/\rho_s * \Delta \rho_s / \Delta t = W_s / \eta \quad (13)$$



$\rho_s$  est la densité du solide,  $Ws$  le poids et  $\eta$ , un coefficient de viscosité.

Une relation a été établie entre le coefficient de viscosité et la température (Anderson, 1976).

$$\eta_t/\eta_0 = \exp(A/R*(T_c-T)/(T*T_c)) \quad (14)$$

$\eta_t$ , un coefficient de viscosité à une température  $T$ ,  $\eta_0$ , un coefficient de viscosité à une température de zéro degré Celcius,  $A$ , une énergie d'activation de neige,  $R$ , une constante des gaz.

L'équation 13 jumelée à 14 donne l'équation 15.

$$1/\rho_s * \Delta\rho_s/\Delta t = C1*\exp(-0.08*(T_c-T)*Ws*\exp(-C2*\rho_s) \quad (15)$$

$C1$  et  $C2$  sont des paramètres de compaction à établir avec les données obtenues sur le site d'étude. Les principes de résolution de l'équation 15 sont décrits dans la littérature (Anderson, 1976; Goodrich, 1976).

La somme des équivalents en eau et des épaisseurs de chaque couche donne l'équivalent en eau et en épaisseur de neige en un point.

La dernière étape est de cartographier les équivalents en eau de la neige du territoire. Également, les figures du suivi des profondeurs de neige permettent de comparer l'évolution des simulations et des données de terrain pour les profondeurs de neige en un point d'étude donné.

### **3. Analyse des résultats**

La période hivernale peut être définie par la présence du manteau blanc sur le sol. Cependant, les simulations et les observations dans le texte couvrent la période du 1<sup>er</sup> octobre au 1<sup>er</sup> juin. Cette étude couvre deux hivers consécutifs (2006-2007 et 2007-2008). Le premier hiver permet d'obtenir les paramètres de calibration nécessaires aux simulations du couvert nival. Ces paramètres permettent d'établir la quantité de précipitations et la fonte des neiges par élévation. Les simulations de neige des deux hivers ont été effectuées avec les paramètres de calibration provenant de l'hiver 2006-2007.

#### **3.1 Analyse de la saison hivernale 2006-2007**

La période hivernale 2006-2007 a débuté tardivement après quelques épisodes de neiges et pluies sans accumulation sur le sol. Le manteau de neige s'est installé de manière définitive sur le sol au début de janvier. D'importantes précipitations de neige ont eu lieu en février et en avril 2007.

Le capteur de température du point 1 (Base altitude 610 m) a été opérationnel du 7 au 24 décembre 2006 et du 17 janvier au 3 mars 2007. Le capteur de température du point 2 (Mégantic altitude 1000 m) a été opérationnel du 7 au 24 décembre 2006 et du 17 janvier au 21 avril 2007. Le capteur de température du point 3 (Chablis altitude 790 m) a été opérationnel du 7 au 24 décembre 2006 et du 17 janvier au 24 mars 2007.

Les activités pour mesurer les densités et les épaisseurs de neige aux points 1 à 7 ont été réalisées le 23 novembre 2006, le 7 décembre 2006, le 16 janvier 2007, les 2 et 3 février 2007, les 17 et 18 février 2007, les 3 au 7 mars 2007, les 24 et 25 mars 2007, les 9 et 10 avril 2007 ainsi que les 20 et 21 avril 2007.

Les positions en basses altitudes comme La Patrie ont eu une saison courte qui a débuté le 2 février 2007 et toute la neige avait fondu dans la semaine du 14 au 20 mars 2007. L'épaisseur de neige maximale a été de 60 cm.

À Base, la saison hivernale a débuté vers le milieu de janvier 2007 pour se terminer vers le 20 avril 2007. Au Chablis la saison hivernale a commencé au mois de novembre. Cependant, de fortes pluies en décembre ont fait fondre la neige. La saison hiver a débuté au mois de janvier pour se terminer vers la fin d'avril 2007.

La saison hivernale a débuté en novembre 2006 à Mégantic. Cette zone a été moins affectée par les pluies de décembre. Il est resté environ 50 cm de neige glacée au sommet malgré la pluie de décembre 2006. De fortes précipitations de neige ont eu lieu en février et également en avril 2007. Cette zone n'a pas connu de dégel en mars. Il n'y avait plus de neige au sol vers le 15 mai 2007.

Les senseurs à neige ont été installés aux positions Base, Chablis et Mégantic durant la saison hiver 2006-2007 et 2007-2008. Le résumé des données se situe en Annexe 10.

Lors de la saison 2006-2007, les senseurs ont été installés fin novembre 2006. Un sac d'absorbant d'humidité a été mis avec chaque microprocesseur et ensuite scellé avec un joint de silicone. Malheureusement durant la période décembre 2006 des fortes pluies ont occasionné des entrées d'eau dans les microprocesseurs. Chaque senseur a été séché et remis en opération sur la montagne au début de janvier 2007. Le senseur de la base a été mis hors circuit au début mars 2007 lorsqu'un animal a sectionné les câbles. Le senseur du Chablis a fonctionné normalement jusqu'à la fin mars 2007. Cependant, plusieurs données étaient corrompues. Des cellules avec des points sans chiffres et d'autres cellules avec des valeurs très élevées ou très basses ont été enlevées de la base de données. Le senseur du sommet a été opérationnel jusqu'à la fin avril 2007.

### *3.1.1. Analyse des précipitations pour la saison hivernale 2006-2007*

La figure 9 représente les quantités mensuelles de pluie et de neige enregistrées à la station météorologique Environnement Canada de Sherbrooke.

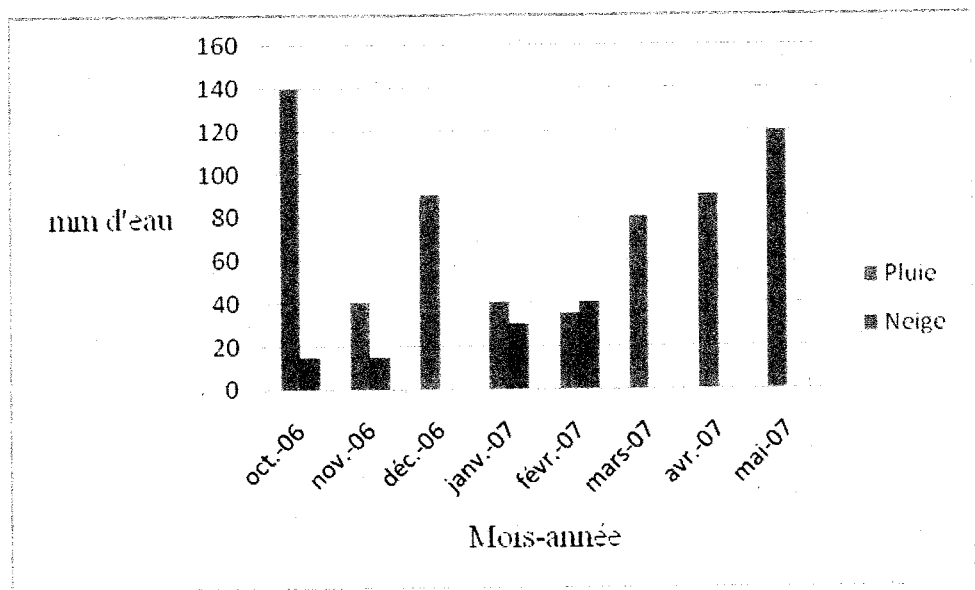


Figure 9 Précipitations mensuelles Sherbrooke pour la période hivernale 2006-2007

3.1.2 Analyse des vents à Sherbrooke

Les précipitations de neige ou de pluie à Sherbrooke peuvent être analysées à partir des données Environnement Canada de Sherbrooke (tableau 2).

**Tableau 2 :** Sommaire des données météo Sherbrooke pour la période hivernale 2006-2007

| Direction du vent            | Sud Ouest | Sud Est | Nord Ouest | Nord Est |
|------------------------------|-----------|---------|------------|----------|
| Vent (h)                     | 1339      | 546.5   | 1150.5     | 742      |
| Précipitations de neige (cm) | 24        | 53      | 42         | 68       |
| Précipitations de pluie (mm) | 86        | 28      | 32         | 26       |

Il est intéressant de noter que la pluie est arrivée avec une direction de vent sud-ouest dans la plupart des cas durant l’hiver 2006-2007. Par contre, la neige arrive avec les vents de provenance nord-est. Les vents sud-ouest dominant cet hiver-là, donc il est tombé beaucoup de pluie, 48% des précipitations pour être précis. Si tout était tombé sous forme de neige, on aurait eu 359 cm de neige avec un ratio neige / pluie de 10/1. Les conditions de poudrerie de neige sont possibles. Bien que le transport de la neige soit intégré dans le modèle, un travail doit être fait pour considérer le transport lors de rafales de vents et la déposition lors de périodes plus calmes (Liston and Sturm, 1998).

3.1.3. Températures de l’air estimées et réelles aux sites d’études

L’estimation de la température de l’air décrit à la section 3.1 est comparée à la température moyenne de 5 thermocouples exposés à l’air. Le gradient de température journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et la température de l’air de Sherbrooke sont utilisés pour calculer l’estimation de la température de l’air. La figure 10 illustre la

comparaison de la température de l'air estimée théoriquement versus la température de l'air mesurée par la sonde à Base pour toute la période opérationnelle de la sonde à la Base durant l'hiver 2006-2007.

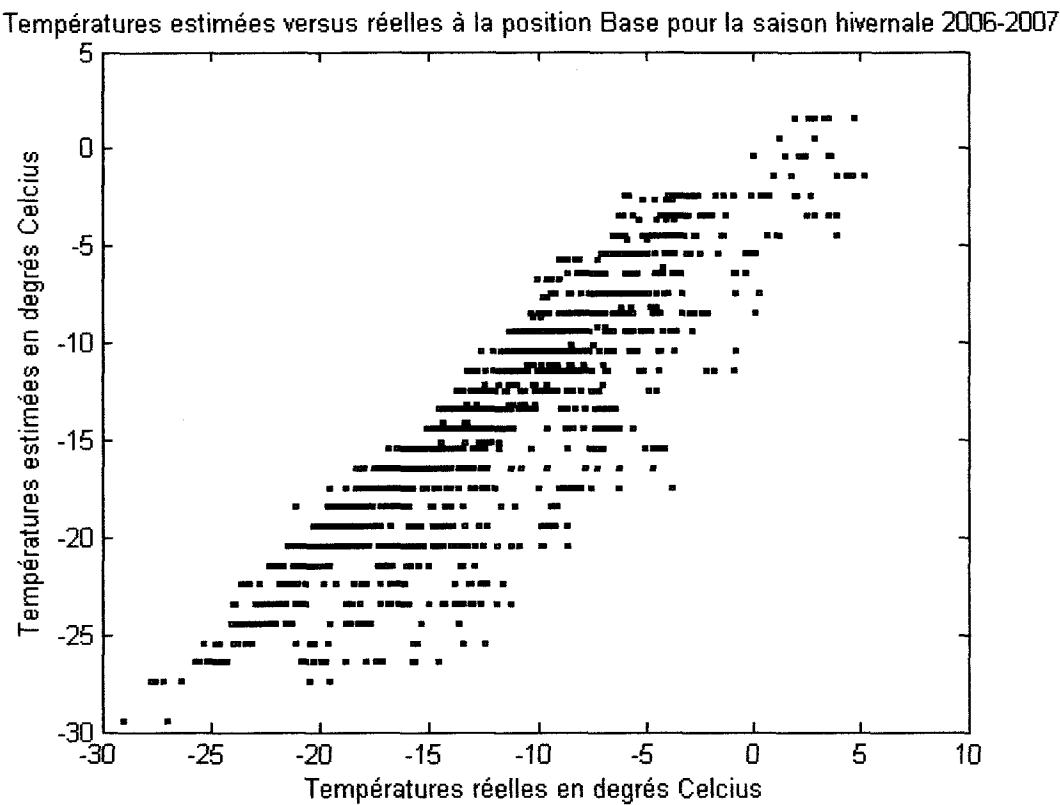
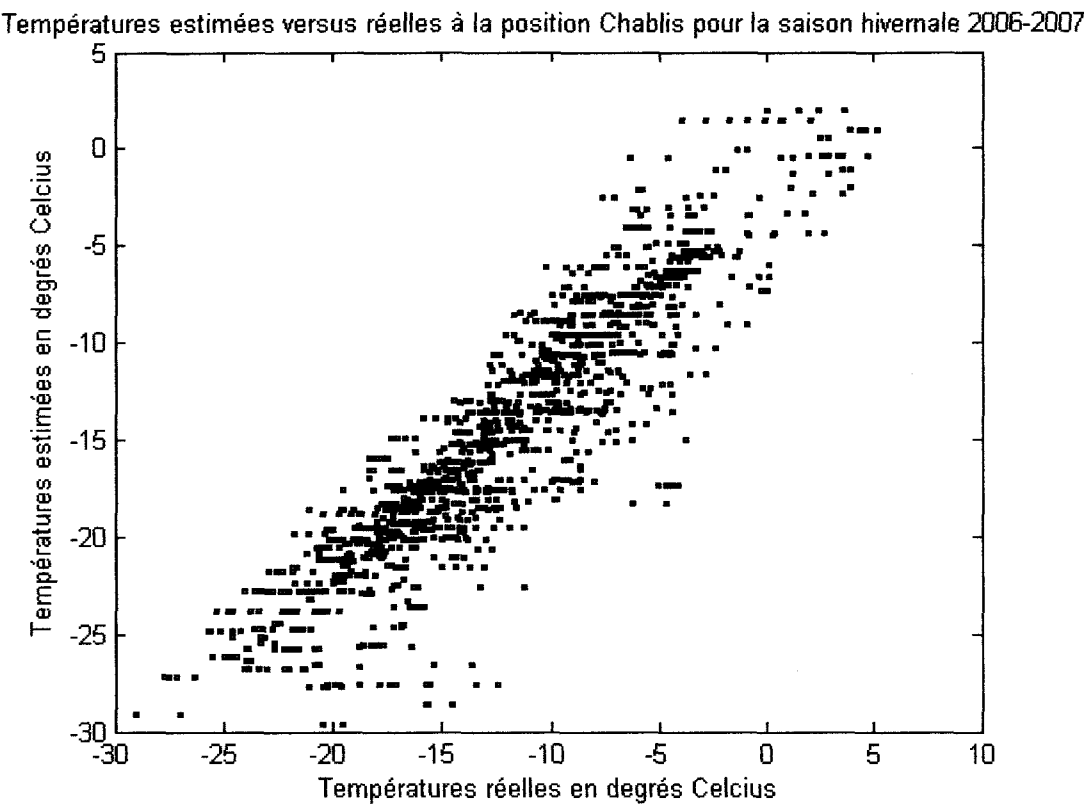


Figure 10 Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Base pour la période hivernale 2006-2007

Les températures théoriques sont souvent inférieures aux températures réelles. Ceci occasionne des mauvais partages de précipitation. Par exemple, lorsqu’il tombe une neige mouillée à la Base, le modèle peut théoriquement supposer une précipitation sous forme de neige, car la température théorique est inférieure à 0 Degré Celcius.

La figure 11 illustre la comparaison de la température de l’air estimée théoriquement versus la température moyenne de 5 thermocouples exposés à l’air pour toute la période opérationnelle de la sonde à Chablis durant l’hiver 2006-2007.



**Figure 11** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Chablis pour la période hivernale 2006-2007

Les écarts entre les estimations et les températures réelles à la position Chablis diffèrent de la position Base. Il peut être observé un nombre sensiblement égal d'écarts positifs et négatifs. Une inversion thermique en montagne engendre une température de l'air plus chaude à Mégantic et plus froid à Base. La condition favorable pour une inversion thermique se produit lorsque le ciel est dégagé et les vents faibles ou inexistant.



La figure 12 illustre la comparaison de la température de l'air estimée théoriquement versus la température moyenne de 5 thermocouples exposés à l'air pour toute la période opérationnelle de la sonde à Mégantic durant l'hiver 2006-2007.

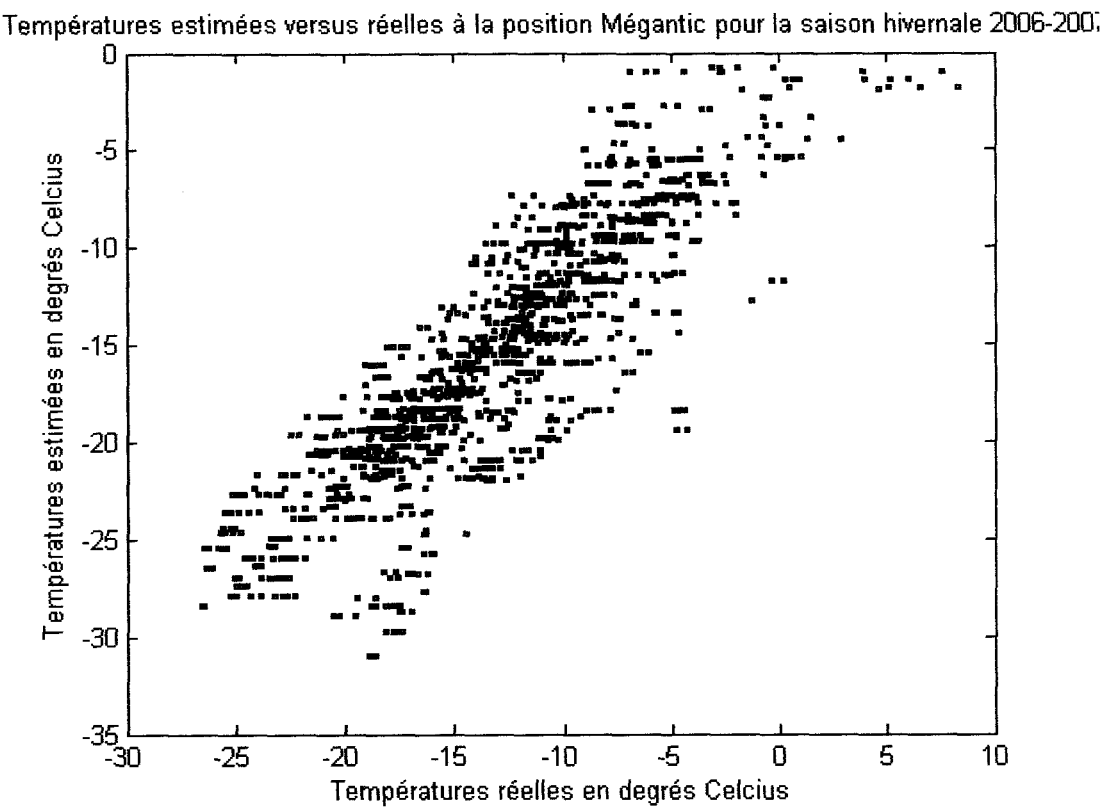


Figure 12 Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Mégantic pour la période hivernale 2006-2007

Les observations de la figure 11 s'appliquent également à la figure 12. Les masses d'air chaud et froid se mélangent rarement de manière uniforme en montagne. Lors de la période hivernale, il arrive souvent que l'air chaud et humide demeure sur les sommets alors que l'air froid et sec reste en basse altitude. On observe souvent un couvert nuageux au dessus des sommets. À l'inverse, les vents violents entraînent l'air froid en altitude.

3.1.4 Variation de la précipitation en fonction de l'élévation

Il est reconnu dans plusieurs littératures, l'importance de l'élévation sur les quantités de précipitations (Anderton et al., 2004, Lehning and Bartelt, 2002a, Lehning and Bartelt, 2002b, Lehning and Bartelt, 2002c, Lopez Moreno et Noguès-Bravo, 2006). Cette variation peut être représentée par une équation linéaire entre les ratios de précipitation et l'élévation pour le territoire (figure 13). Le ratio de précipitation est le quotient de la quantité de précipitation pour une élévation donnée sur celle de Sherbrooke.

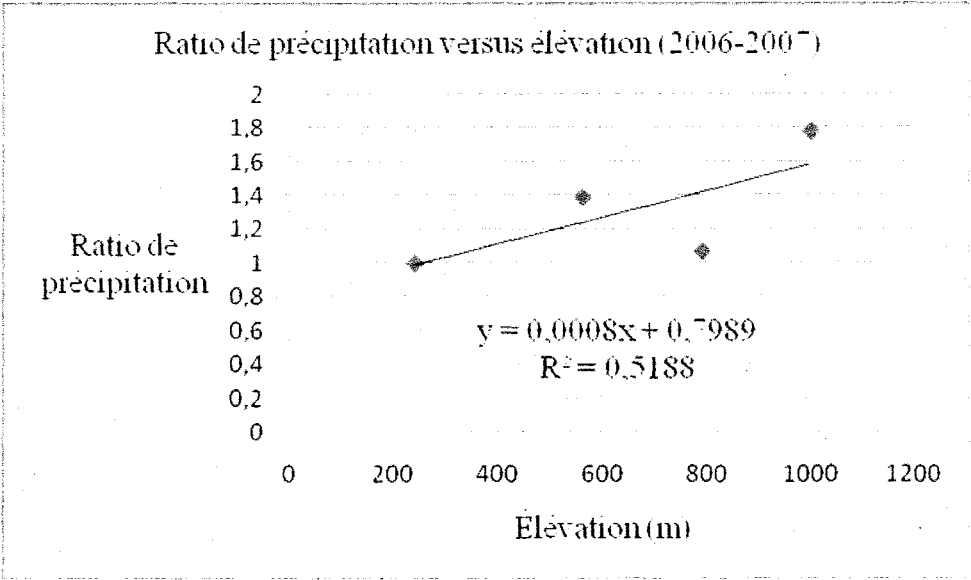


Figure 13 Précipitation versus élévation pour la période hivernale 2006-2007

3.1.5 Variation du facteur de fonte et du délai de la fonte en fonction de l'élévation

Les facteurs de fonte et le délai calibrent bien la fonte des neiges. Ils varient selon l'altitude. Les figures 14 et 15 représentent l'équation linéaire entre ces facteurs et l'élévation.

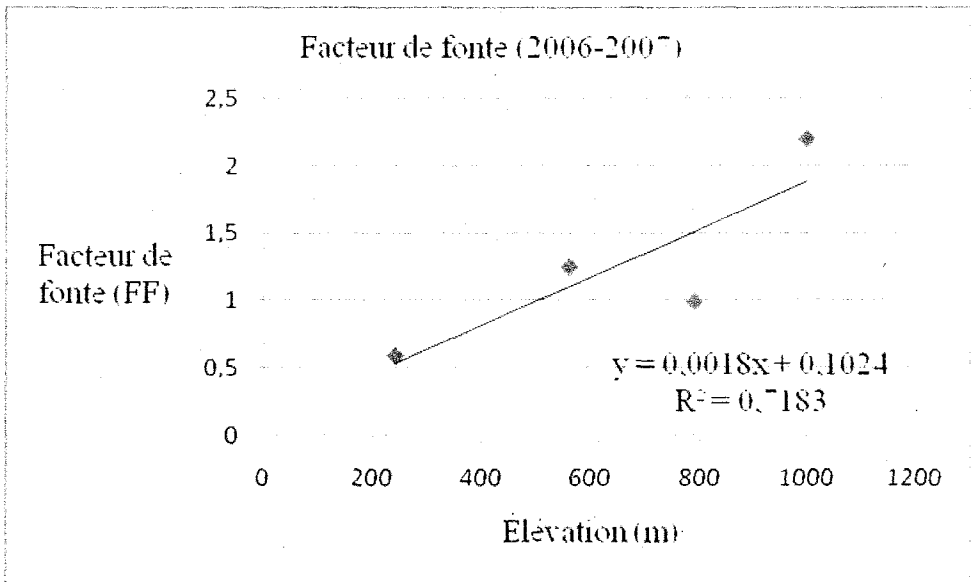


Figure 14 Facteur de fonte (FF) versus élévation pour la période hivernale 2006-2007

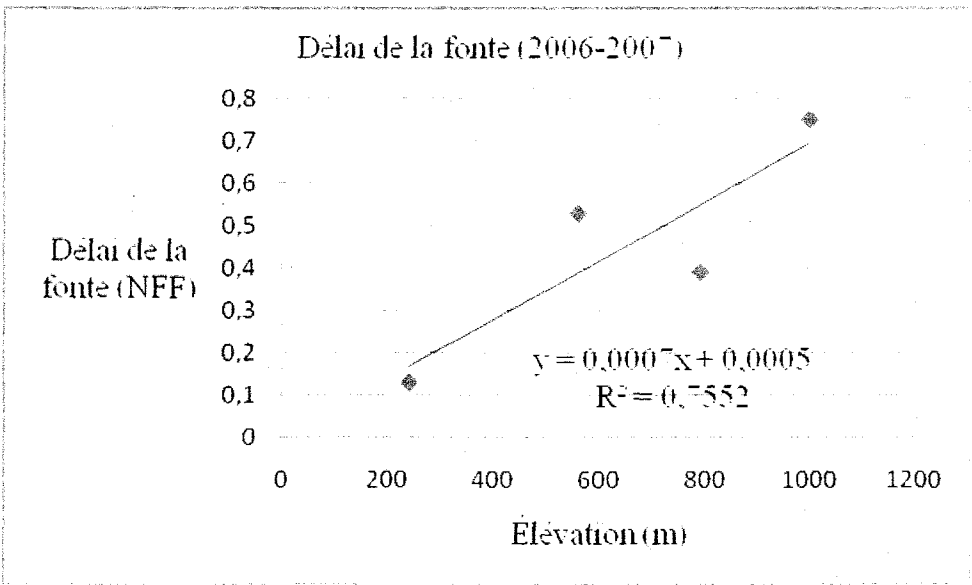


Figure 15 Délai de fonte (NFF) versus élévation pour la période hivernale 2006-2007

### *3.1.6 Cartes d'équivalents en eau de la neige*

Les cartes en Annexes 14 et 15 illustrent les équivalents en eau de la neige de la région. Il y a 30 cartes d'équivalents en eau de la neige pour la saison hivernale 2006-2007. L'algorithme a été simplifié pour réduire le nombre d'itérations. L'équivalent en eau de neige de chaque élévation a été simulé en supposant que le territoire est occupé par la forêt seulement. Cette procédure a permis de simuler les équivalents en eau de la neige sur le territoire à l'aide d'un ordinateur portable.

### *3.1.7 Cartes d'épaisseurs de la neige*

Les cartes en Annexes 14 et 15 correspondent aux simulations hebdomadaires d'épaisseur de neige sur le territoire. Il y a 30 cartes d'épaisseurs de neige pour la saison hivernale 2006-2007. Ces figures ont été produites de manière similaire à celles des équivalents en eau de la neige.

Les figures 16, 17, 18, 19 et 20 représentent les simulations des épaisseurs de neige aux positions de la montagne Base, Chablis et Mégantic et milieux ouverts Milan et Notre-Dame-des-Bois pour la période hivernale 2006-2007.

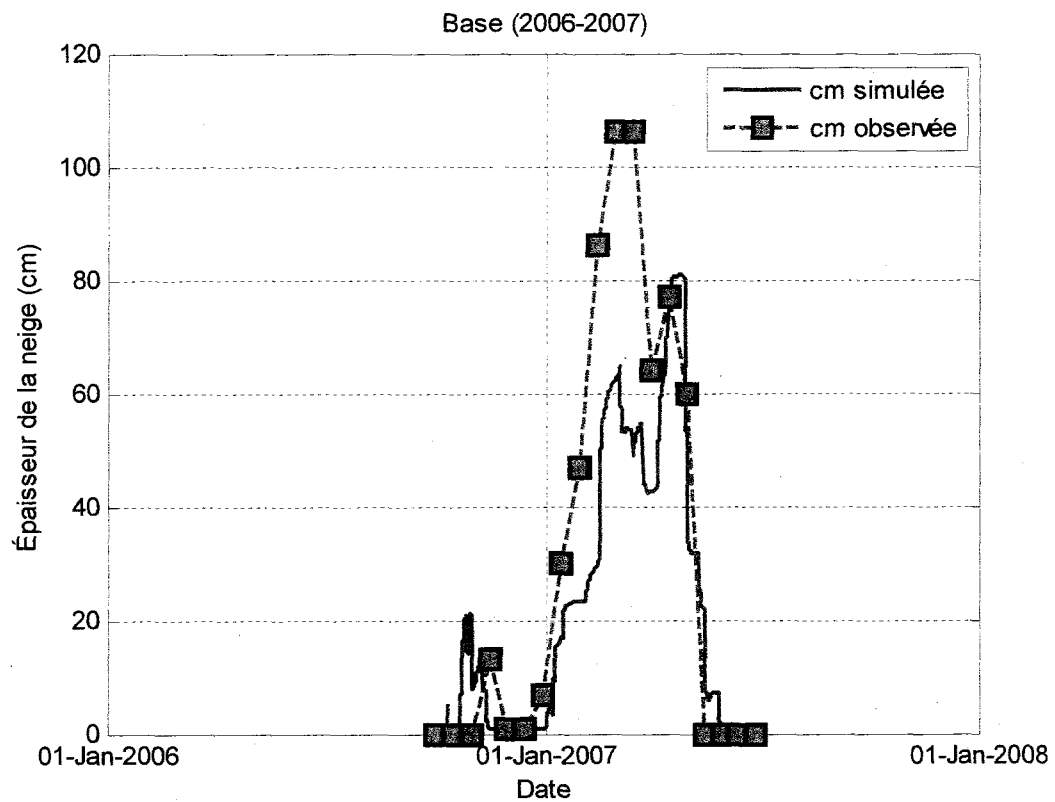


Figure 16 Épaisseur de neige simulée versus réelle à la Base pour la période hivernale 2006-2007

Le modèle sous-estime l'épaisseur de neige au sol lors de la période d'accumulation. Le programme ne réussit pas à reproduire la croissance continue du couvert nival en période d'accumulation. Ceci nous indique une différence dans les précipitations de Sherbrooke et de Base et Chablis (figures 16 et 17).

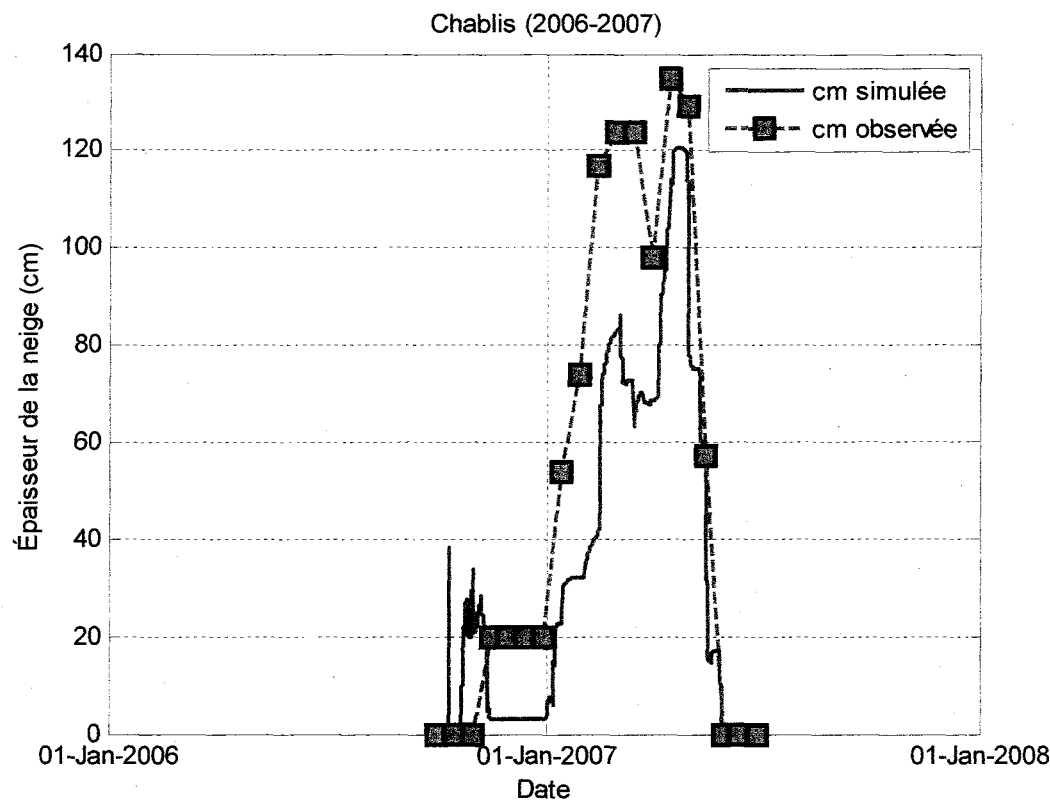


Figure 17 Épaisseur de neige simulée versus réelle à la position Chablis pour la période hivernale 2006-2007

Les estimations des épaisseurs de neige au sol pour le secteur Chablis sont plus proches de la réalité du terrain que ceux de Base.

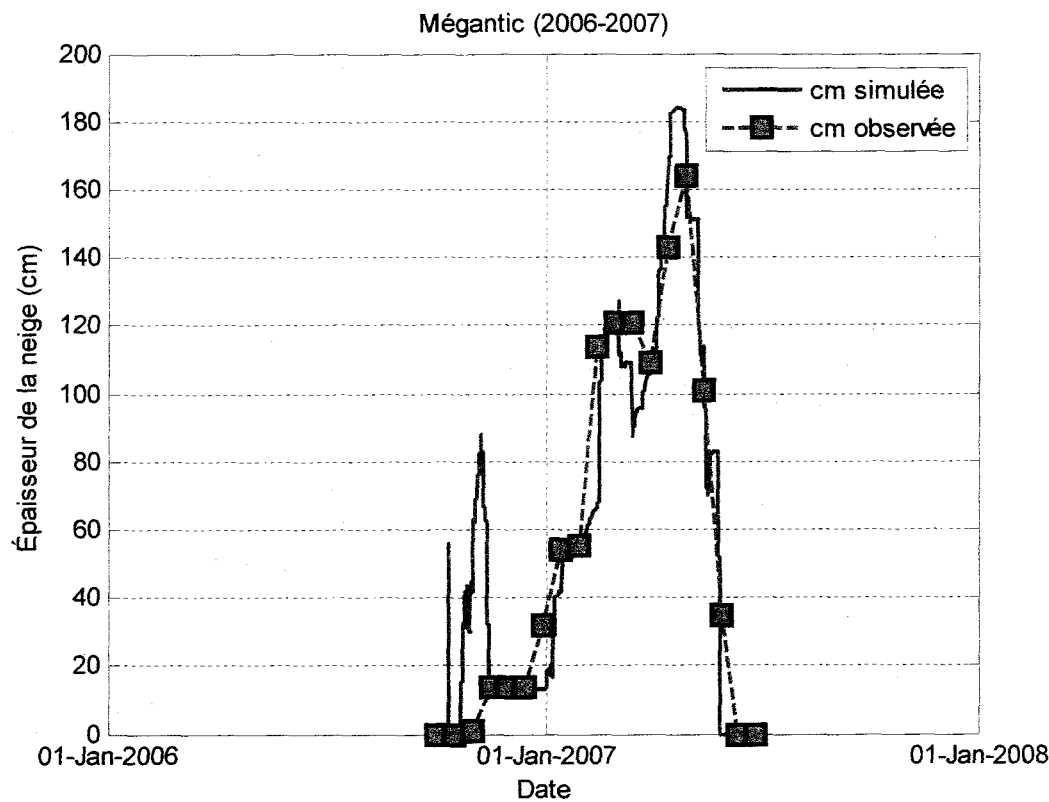


Figure 18 Épaisseur de neige simulée versus réelle Mégantic pour la période hivernale 2006-2007

Le modèle surestime les épaisseurs de neige au sol pour Mégantic au début et la fin de la période d'accumulation des neiges. Il faut remarquer également la fonte du couvert nival. Il est possible que, en raison de la grande quantité de neige au sol, la compaction soit adéquate pour Mégantic et trop prononcée pour Base et Chablis.

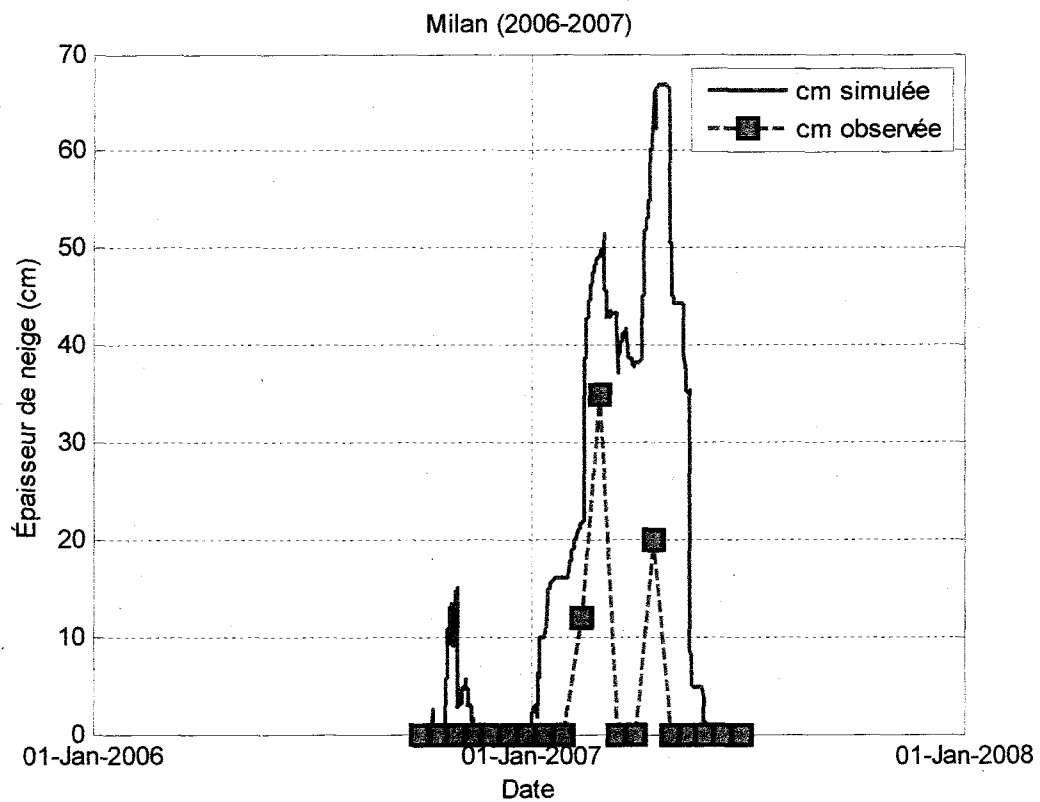


Figure 19 Épaisseur de neige simulée versus réelle station MDDEP Milan pour la période hivernale 2006-2007

Le modèle surestime le couvert nival à Milan (figure 19). Il est possible que la prédiction du transport éolien des neiges ne soit pas adéquate à Milan.



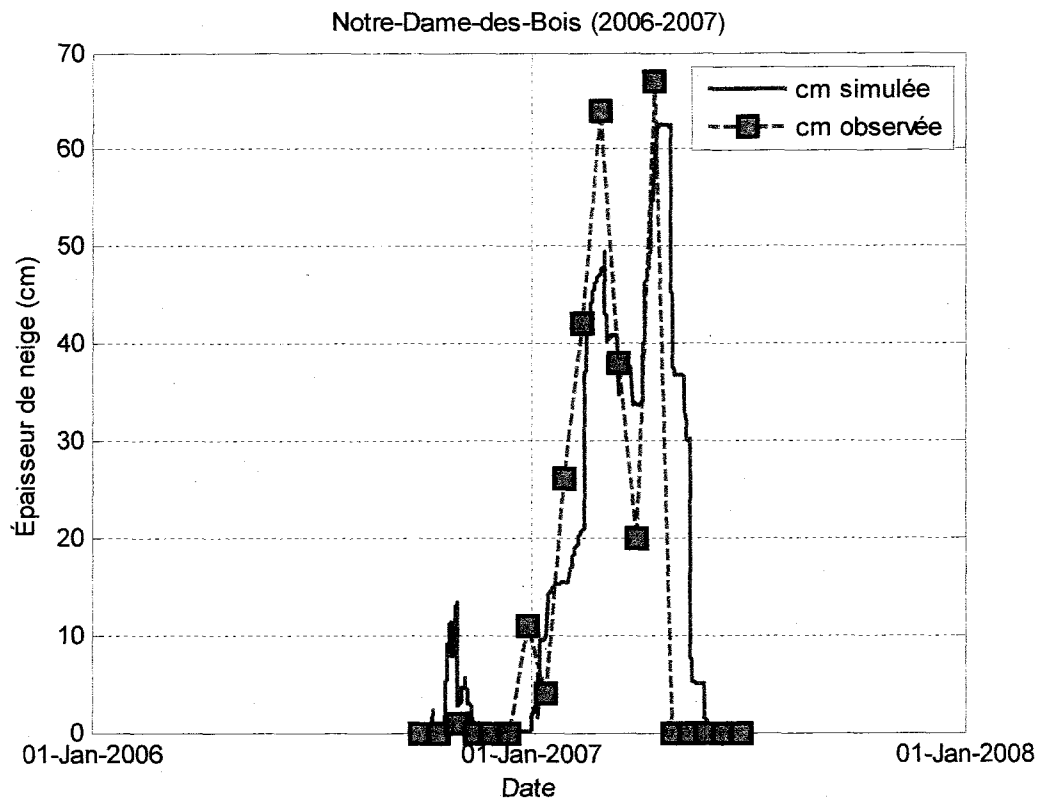


Figure 20 Épaisseur de neige simulée versus réelle station MDDEP Notre-Dame-des-Bois pour la période hivernale 2006-2007

Également à Notre-Dame-des-Bois, la quantité de neige au sol simulée diffère de la réalité en début de saison et à la période maximale d'accumulation de neige au sol. Par contre, les taux d'augmentation et la perte de la quantité de neige au sol correspondent bien à ce qui est observé.

La simulation des épaisseurs de neige pour la période hivernale 2006-2007 indique que chaque secteur réagit selon une dynamique différente. Ceci est une indication que chaque système météo dépose des quantités différentes de précipitation de ce qui est théoriquement estimé. Ceci semble confirmer le comportement spécial de la montagne dans la région face aux précipitations.

Les épaisseurs de neige en milieu ouvert changent constamment sous l'effet du vent et de la radiation. Le modèle surestime le couvert nival à Milan (figure 19). Il est possible que la prédiction du transport éolien des neiges ne soit pas adéquate à Milan.

### **3.2 Analyse de la saison hivernale 2007-2008**

La saison hivernale a débuté de manière hâtive au milieu novembre 2007 pour se terminer le 25 mai 2008 à Mégantic. Le capteur de température du point 1 (Base) a été opérationnel du 1er décembre 2007 au 14 mai 2008.

Le capteur de température du point 2 (Mégantic) a été en opération du 1er au 20 décembre 2007 et du 7 février au 17 mars 2007. Celui du point 3 (Chablis) a été opérationnel du 1er au 17 avril 2007.

La collecte des données de densités et d'épaisseurs de neige a été faite les 1<sup>er</sup> et 2 décembre 2007, les 11 et 12 janvier 2008, les 23 et 24 janvier 2008, les 7 et 8 février 2008, les 26 et 27 février 2008, les 16 et 17 mars 2008, les 7 et 8 avril 2008, les 25 et 26 avril 2008, ainsi que le 14 mai 2008.

La saison hivernale a débuté en décembre 2007 pour se terminer le 20 avril 2008 pour la Base. Elle a commencé au mois de novembre 2007 pour se terminer vers le 30 avril 2008 au Chablis alors que Mégantic a reçu la neige en novembre 2007. Il y a eu un épisode de verglas en février 2008. Cette zone n'a pas connu de dégel. Il n'y avait plus de neige au sol le 15 mai 2008.

Lors de la saison 2008, le capteur installé à Mégantic a subi une panne occasionnant une absence de collecte de données pour la période du 20 décembre 2007 au 22 février 2008. Les deux tentatives de réinstallation au sommet ont avorté le 25 janvier et le 8 février 2008. Les données au sommet pour 2008 ont été prises à partir du début décembre et du 22 février au 17 mars 2008. Il faut noter que ce capteur a été installé à 1 mètre du sol. Le capteur de Base a été

opérationnel durant toute la période du début de décembre à la fin d’avril. Le capteur du Chablis a cessé de fonctionner le 17 mars 2008.

Les simulations des équivalents en eau de neige et épaisseurs de neige ont été faites avec les paramètres de calibration provenant de la période hivernale 2006-2007.

3.2.1 Analyse des précipitations pour la saison hivernale 2007-2008

Il y a eu de très fortes précipitations lors de l’hiver 2007-2008. Les périodes de l’automne et du printemps ont été très propices aux précipitations. À Sherbrooke, il y a eu une alternance de pluie et de neige durant l’ensemble de la période hivernale (Figure 21).

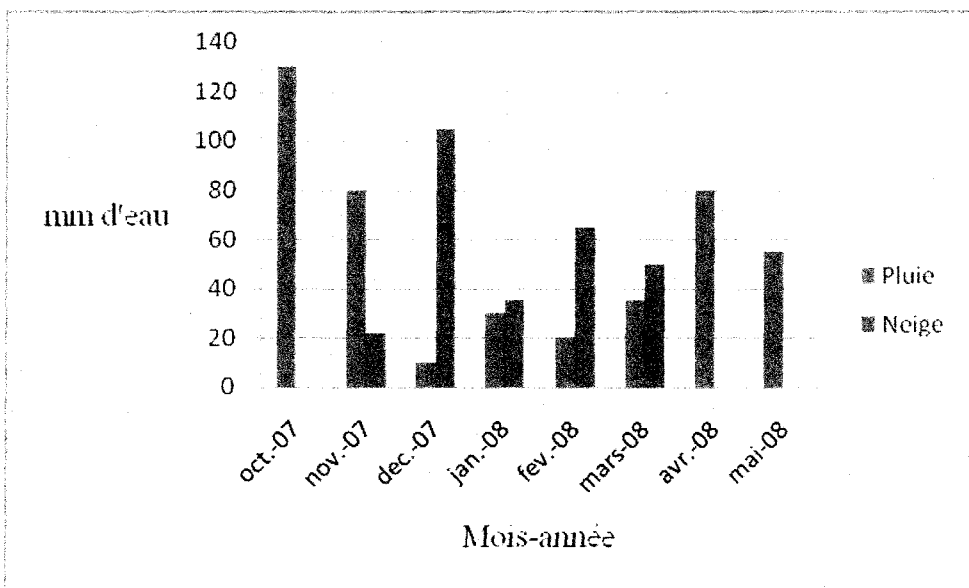


Figure 21 Précipitations mensuelles Sherbrooke pour la période hivernale 2007-2008

3.2.2 Analyse des vents à Sherbrooke

Le sommaire des données météorologiques de Sherbrooke est résumé dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Sommaire des données météo Sherbrooke hiver 2007-2008.

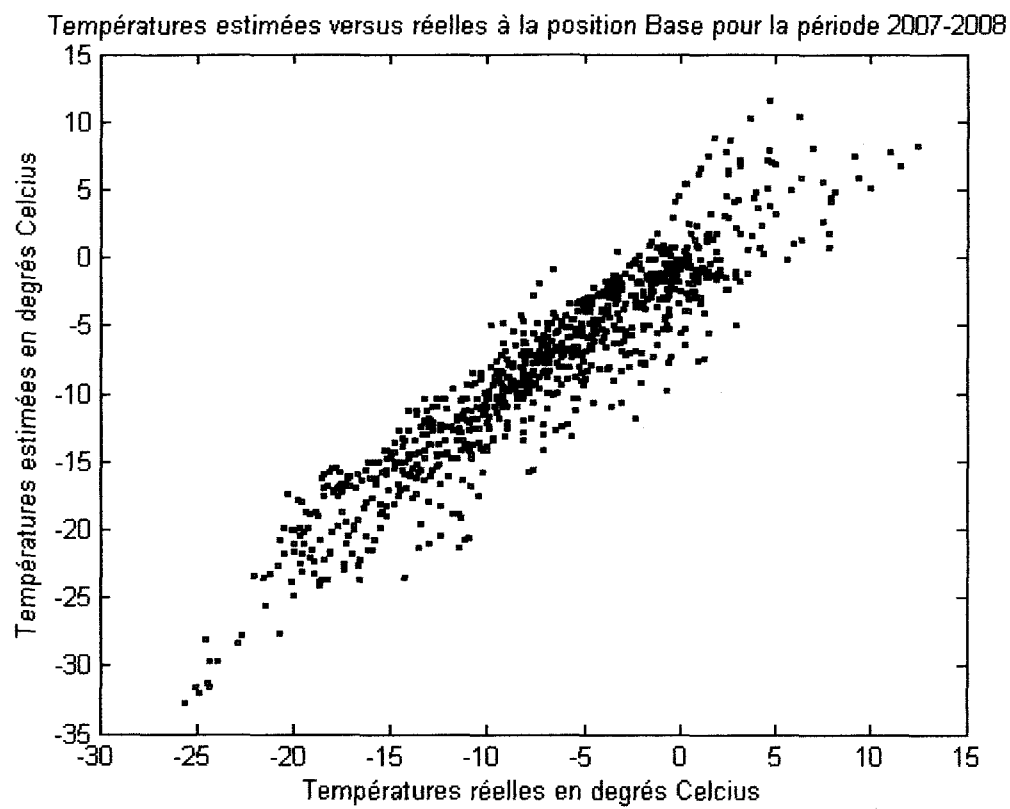
| Direction vent               | Sud Ouest | Sud Est | Nord Ouest | Nord Est |
|------------------------------|-----------|---------|------------|----------|
| Vent (h)                     | 1422      | 714     | 893        | 878      |
| Précipitations de neige (cm) | 50.2      | 64.52   | 36.97      | 90.7     |
| Précipitations de pluie (mm) | 43.74     | 64.96   | 26.94      | 76.88    |

Les vents d’Est amènent plus de précipitations que les vents d’Ouest. Il y a eu une augmentation de 26 % des précipitations à l’hiver en 2007-2008 par rapport à 2006-2007. La pluie représente 47% du total des précipitations ce qui n’est pas une grosse différence avec l’hiver précédent.

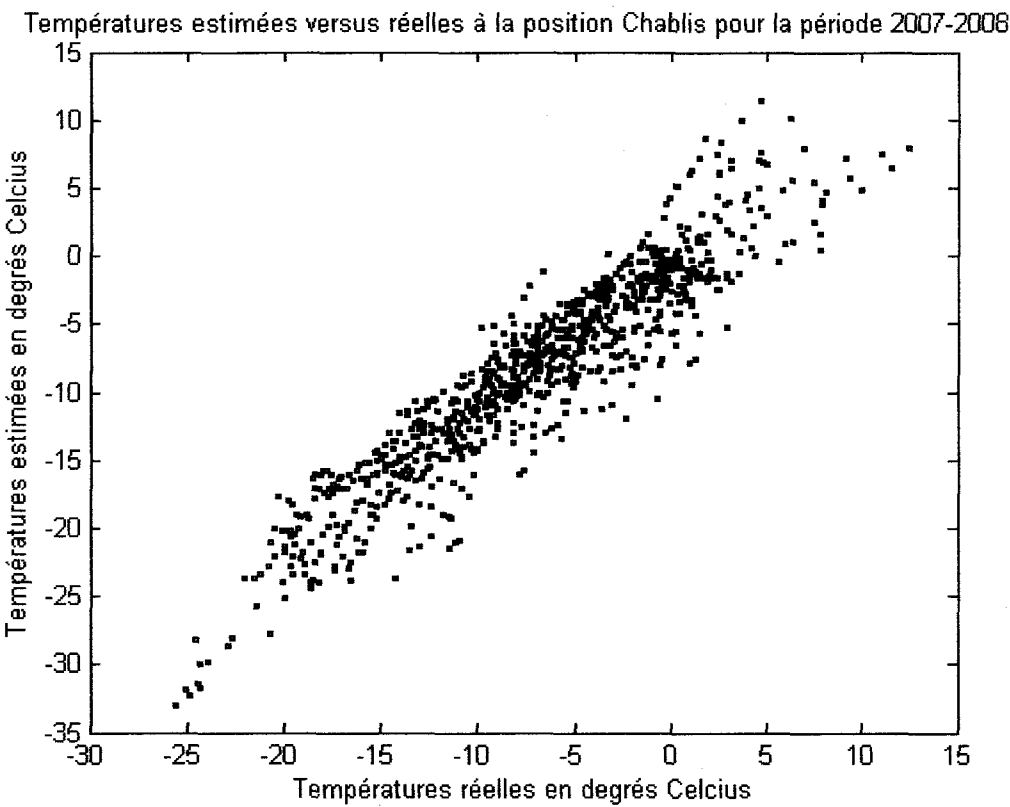
3.2.3 Températures de l’air estimées et réelles aux sites d’études

L’estimation de la température de l’air provient du gradient journalier moyen Sherbrooke-Notre-Dame-des-Bois. Il est comparé aux températures moyennes de 5 thermocouples exposés à l’air pour les positions (Base, Chablis, Mégantic) durant l’hiver 2007-2008.

Les températures obtenues théoriquement se comparent aux températures réelles (figures 22, 23, 24).



**Figure 22** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Base pour la période hivernale 2007-2008



**Figure 23** Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Chablis pour la période hivernale 2007-2008

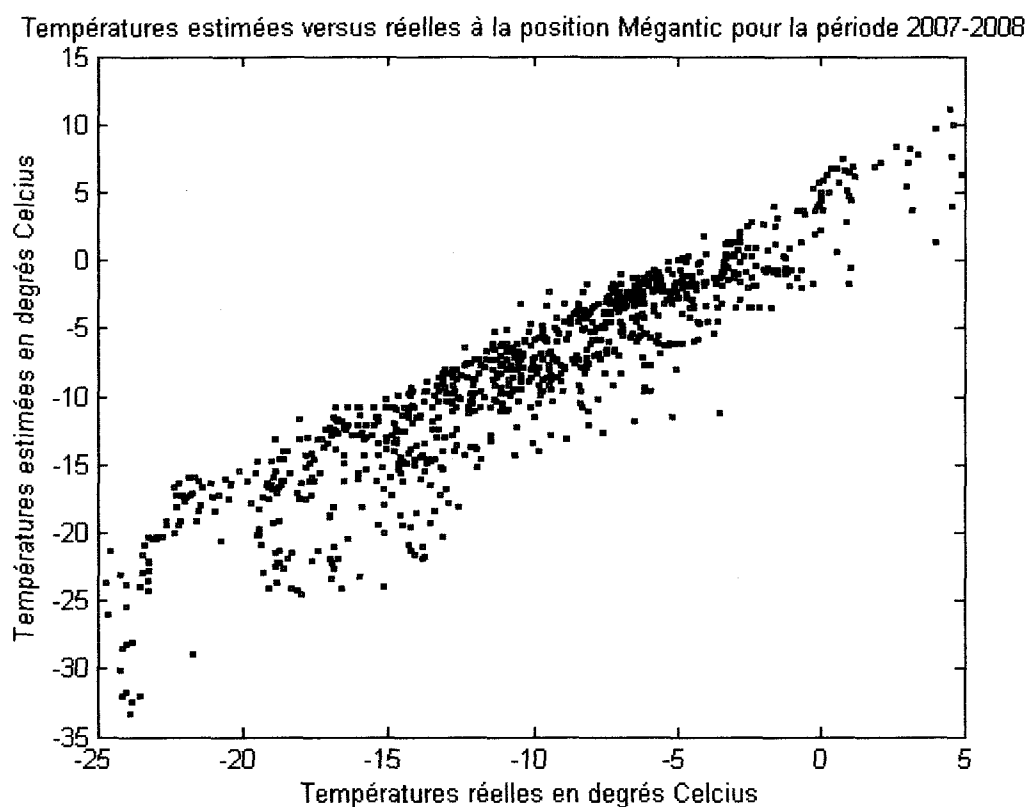


Figure 24 Températures estimées par gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois et températures réelles à la position Mégantic pour la période hivernale 2007-2008

Comme lors de l’hiver précédent, la température estimée théoriquement semble plus basse que la température réelle lorsque cette dernière se trouve au point de congélation. Le modèle surestime la quantité de neige à la position Base, Chablis et Mégantic par rapport à la réalité. L’air ambiant subit des turbulences au-dessus du Mont-Mégantic. Il a été observé lors de mes visites et aussi lors d’un examen comparatif des conditions météorologiques entre Sherbrooke et la montagne, que les nuages sont plus souvent fréquents dans ce secteur qu’à Sherbrooke.

#### *3.2.4 Cartes des équivalents en eau de la neige*

Le traitement de chaque période permet de produire une carte de neige hebdomadaire. Les équivalents en eau de la neige sont illustrés en Annexe 16 pour le territoire Sherbrooke-Mont-Mégantic. Il est observé sur ces cartes un comportement distinct de la région du mont Mégantic en ce qui concerne les accumulations de neige. Les quantités de neige présentes au sol augmentent fortement sur le Mont Mégantic comparé à l'ensemble de la région.

#### *3.2.5 Cartes des épaisseurs de neige*

Le traitement de chaque période permet de produire une carte de neige hebdomadaire. L'épaisseur de neige est illustrée en Annexe 16 pour le territoire Sherbrooke-Mont-Mégantic.



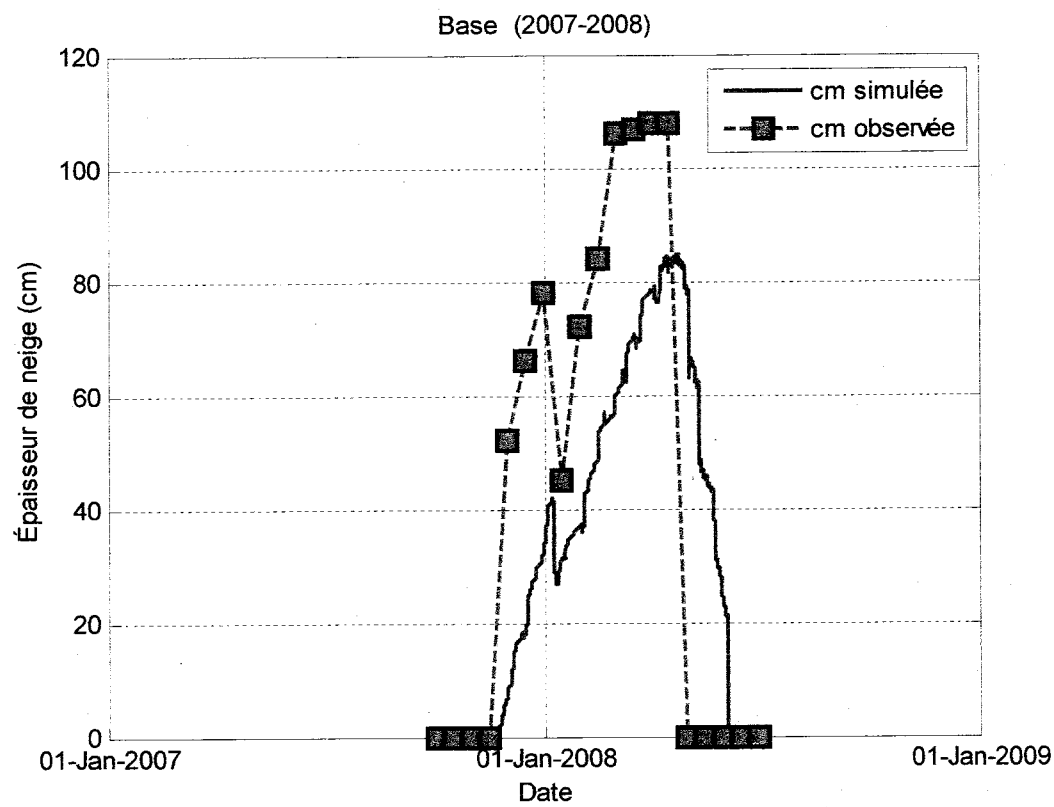


Figure 25 Épaisseur de neige simulée versus réelle Base pour la période hivernale 2007-2008

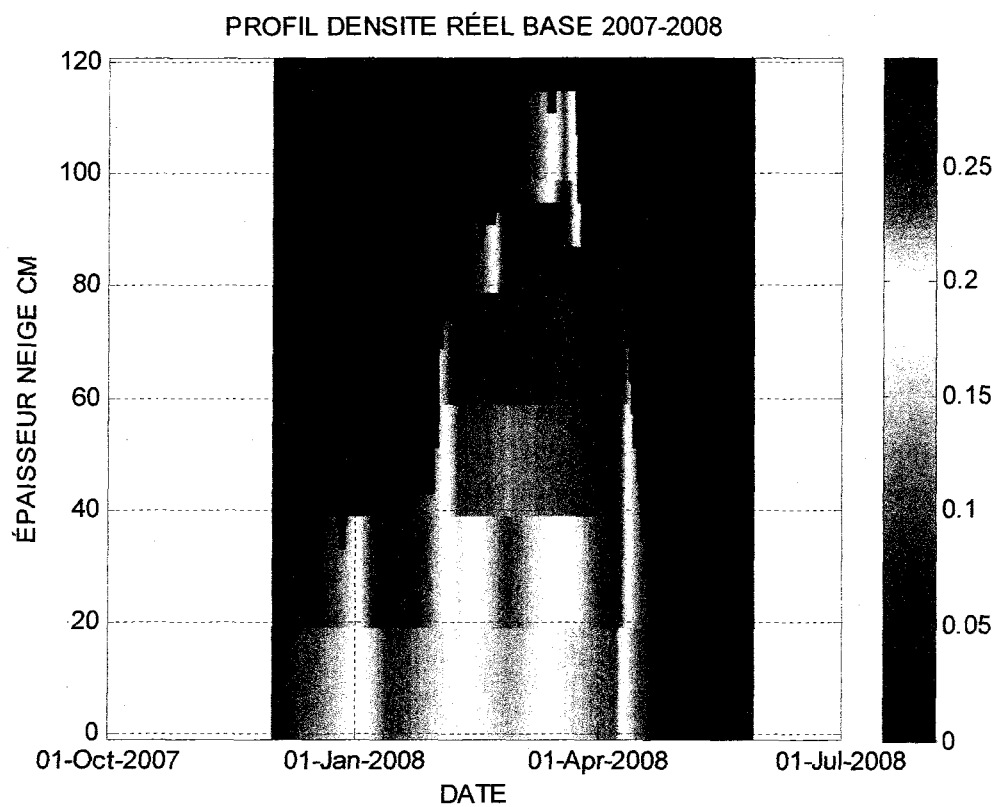


Figure 26 Profil densité Base pour la période hivernale 2007-2008

Un profil réel des densités de neige dans le couvert nival est reproduit à la figure 26. Les densités de neige réelles varient avec la profondeur et également avec le temps.

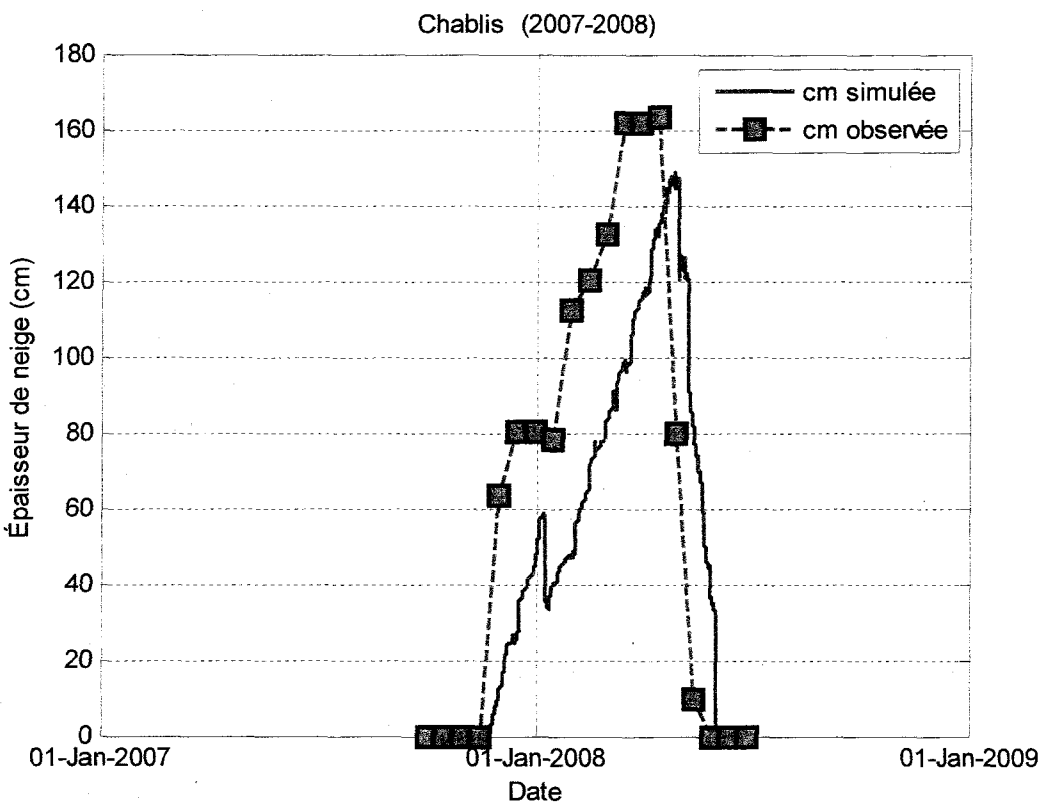


Figure 27 Épaisseur de neige simulée versus réelle Chablis pour la période hivernale 2007-2008

Des ajustements importants à la quantité de précipitation ont été faits pour mieux reproduire l'épaisseur de neige à la figure 27. La quantité de précipitation a été ajustée à 35% par rapport à celle de 2006-2007.

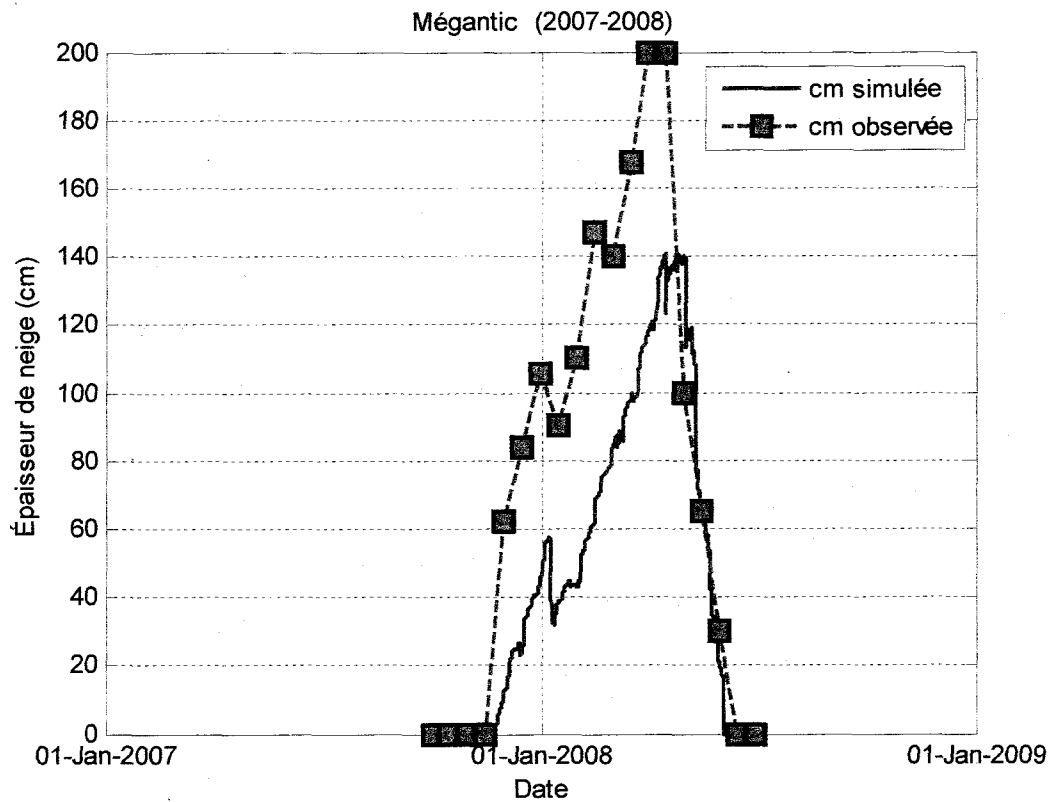


Figure 28 Épaisseur de neige simulée versus réelle Mégantic pour la période hivernale 2007-2008

La quantité de précipitation a été réduite de 48% par rapport à 2006-2007 à Mégantic pour obtenir une très bonne représentation numérique du couvert nival (figure 28). La figure 29 représente une simulation en milieu ouvert à Notre-Dame-des-Bois. Les écarts obtenus sont plus importants qu'en milieu forestier.

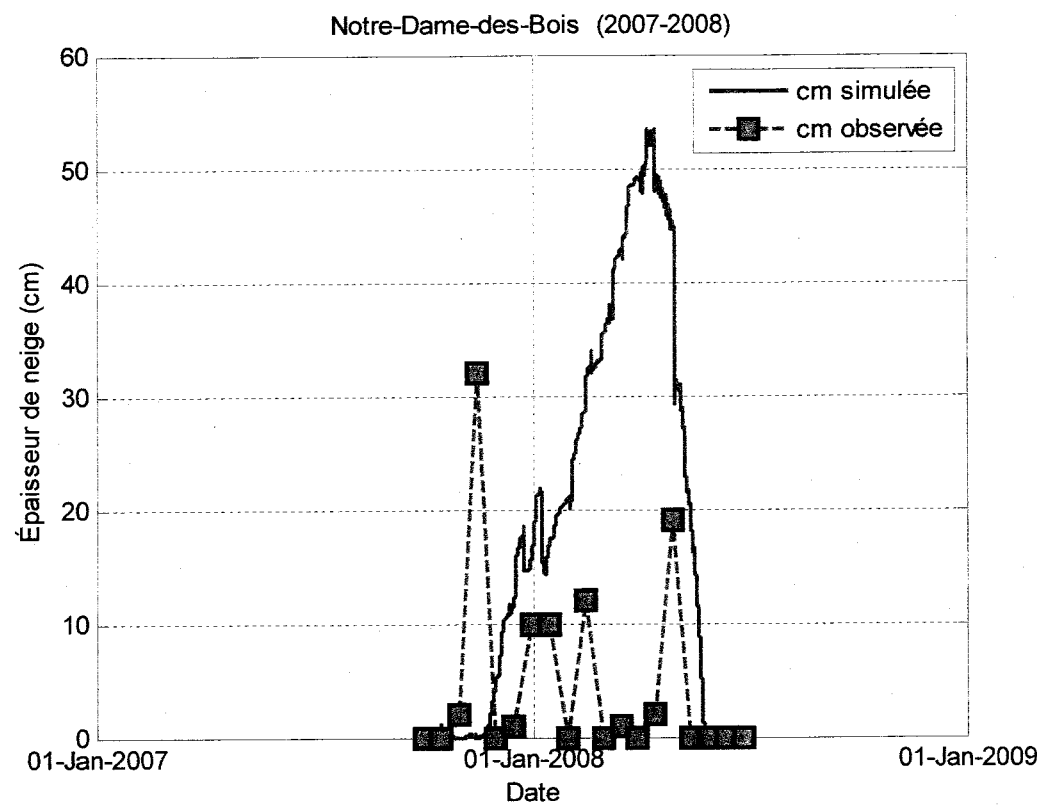


Figure 29 Épaisseur de neige simulée versus réelle Notre-Dame-des-Bois pour la période hivernale 2007-2008

Le modèle surestime les quantités de neige sur la montagne. Une explication possible vient des estimations de températures de l'air. La température estimée est souvent inférieure à la température réelle et le modèle effectue un partage de précipitation vers la neige. En ajustant le ratio de précipitation, il est possible d'améliorer les simulations.

Par contre, il peut être observé en Annexes 13 et 14 que les précipitations pour les positions Mégantic et Base n'ont pas vraiment changé entre les périodes hivernales 2006-2007 et 2007-2008. Pour Chablis, elles doublent entre 2006-2007 et 2007-2008. Par conséquent, la surestimation du modèle provient probablement des estimations de températures pour Base et Mégantic alors qu'une autre interprétation doit être formulée pour Chablis.

L'examen du couvert nival révèle de multiples lamelles de glace dans le couvert nival à Mégantic. A quelques deux cents mètres plus bas, à Chablis, aucune lamelle de glace n'est visible. Des précipitations de pluie sont donc probables sur Mégantic alors qu'à Chablis s'observe une précipitation sous forme de neige

Le partage des précipitations est aussi problématique à Sherbrooke. Voici quelques situations pour illustrer ce phénomène : la station d'Environnement Canada de Sherbrooke indique de la pluie à Sherbrooke alors que la température de l'air est de  $-7.6^{\circ}\text{C}$  (11 avril 2007 à 10 heures). Le 16 avril 2007 à 8 heures la station indique de la neige alors que la température de l'air est de  $2.7^{\circ}\text{C}$ . Le 27 avril 2007 à 3 heures la station indique de la pluie alors qu'il fait une température de  $-4.6^{\circ}\text{C}$ .

Le partage des précipitations est critique pour le modèle surtout dans les situations de grandes précipitations proches du point de congélation. Par exemple, le 15 mai 2007, une pluie continue tombe à la station Sherbrooke pendant 24 heures pour un total de 51 mm d'eau. Le parc Mont-Mégantic enregistre des températures entre 0 et  $-2^{\circ}\text{C}$ . Un partage approximatif de précipitation pluie-neige a été fait pour Mégantic pendant la nuit.

La correspondance des jours de précipitations entre la station Sherbrooke et le Mont-Mégantic ne semble pas toujours évidente. Par exemple, en janvier 2007, il y a eu 9 jours de

précipitations à Sherbrooke et 17 jours au Mont-Mégantic et en février 2007, 13 jours à Sherbrooke contre 17 jours au Mont-Mégantic.

Les jours de précipitations de la station Sherbrooke ne correspondent pas au Mont-Mégantic pour les 2, 5, 6, le 13 janvier 2007, le 12 février, les 3 au 9 et les 12 au 16 avril 2007, le 17, le 21 et le 28 mai 2007. Une morphologie montagneuse crée une climatologie particulière. Certains systèmes météorologiques résident plus longtemps sur la montagne comme emprisonnés et les précipitations durent plus longtemps. En conclusion, il est difficile de partager la précipitation avec la température et d'estimer le partage des précipitations entre la pluie et la neige. Les précipitations sont très importantes pour la simulation. Ils déterminent l'accumulation et la fonte du couvert nival. La température est également utilisée pour déterminer la fonte du couvert nival en montagnes forestières lorsqu'il ne pleut pas.

Ces facteurs sont estimés à l'aide des températures sur la montagne. L'erreur créée par les estimations de températures sur la montagne peut être responsable pour les différences dans la fonte pour la période avril-mai en 2007 versus 2008. Il est évident que les microclimats sur la montagne peuvent engendrer des erreurs. Les inversions thermiques sont fréquentes en hiver ; ce qui peut changer les estimations de température.

En ce qui concerne le calcul d'un facteur de compaction par site d'étude, il est dépendant de la température utilisée. Les senseurs de température utilisés sont sensibles à l'humidité et n'ont pas été opérationnels pour toute la période d'étude. Effectivement, les senseurs n'opèrent pas en périodes de pluie et de fonte des neiges. Des senseurs améliorés pourraient être utilisés pour prendre la température aux sites d'études. La solution alternative d'utiliser le gradient journalier moyen entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois ne donne qu'une approximation des températures de l'air sur le terrain. Cette méthode est basée sur un mélange homogène des couches de l'atmosphère ce qui n'est pas toujours le cas au Mont-Mégantic. Le gradient de température peut varier différemment sur le Mont-Mégantic par rapport aux secteurs de basses altitudes entre Sherbrooke et Notre-Dame-des-Bois.

#### 4. Discussion des résultats

Ce modèle démontre qu'il est possible d'utiliser la température et la précipitation pour représenter l'évolution du couvert nival en un lieu donné. De simples corrélations linéaires utilisant l'élévation peuvent servir à le représenter pour un territoire montagneux et forestier. Cependant, la température de l'air s'extrapole difficilement en raison d'un écart variable entre celle-ci et l'élévation. La structure thermique de l'atmosphère varie constamment et il est probable qu'un estimé journalier soit inadéquat. En absence de celui-ci, il est difficile d'établir avec précision la température en tout lieu. Un mauvais partage de précipitation a des conséquences négatives sur la prédiction du couvert nival. Une précipitation de pluie provoque une fonte accélérée alors qu'une précipitation de neige augmente la quantité d'épaisseur de neige au sol. Les périodes les plus problématiques étant l'automne et le printemps lorsque les précipitations arrivent avec une température proche du point de congélation. Il est donc nécessaire d'ajuster les précipitations dans ces périodes.

En ce qui concerne les milieux ouverts, cette étude montre que le bilan de masse et d'énergie ne représente pas parfaitement le couvert nival. Il faut remarquer qu'un grand nombre de données entrantes pénètrent celui-ci, ainsi que de grandes incertitudes associées à la radiation et la vitesse des vents.

Ce modèle montre également qu'un nombre restreint de paramètres sont utiles pour représenter l'évolution de l'épaisseur de neige. Les facteurs et délais de fonte, les quantités de précipitations par élévation permettent d'obtenir une représentation adéquate du couvert nival. Les paramètres de la compaction n'ayant pu être optimisés avec les données de l'étude faute de convergence, les valeurs des études antérieures ont été utilisées.

L'élévation est donc un facteur important pour connaître les températures et les paramètres du modèle d'index de température. Pour le bilan de masse et d'énergie, plusieurs facteurs doivent être utilisés tel que l'orientation de la pente, la convexité ou la concavité du terrain.



Concernant la période d'évaluation, il est nécessaire d'ajuster le modèle pour les simulations d'un hiver ayant les paramètres d'un hiver antérieur. De meilleurs estimés de température permettraient probablement de réduire ces ajustements. Les modifications changent d'un lieu à un autre.

En résumé, la simplicité du modèle d'index de température permet son utilisation à grande échelle alors qu'un bilan de masse et énergie requiert des ajustements. Par exemple, la présence des nuages influe la radiation. Les rafales et la vitesse des vents sont très variables. Les données de radiation et de vent à chaque heure n'est probablement pas suffisant pour estimer les flux de radiation, chaleurs sensibles et latentes. De plus, les périodes de maximum d'intensité du vent causent d'important transport de neige. Également, les périodes d'intensité minimale provoquent les dépôts de neige. Des remarques semblables peuvent être utilisées pour la radiation. Contrairement à la température, la radiation et le vent peuvent changer beaucoup dans une période d'une heure.

## 5. Conclusion

Le modèle de neige simule l'épaisseur et l'équivalent en eau de la neige sur le territoire Sherbrooke-Mont-Mégantic en utilisant la station météorologique d'Environnement Canada de Sherbrooke et en considérant la topographie et la végétation.

Les hypothèses de recherche ont été vérifiées. Les données de la station météorologique de Sherbrooke ont été extrapolées avec succès à la région de Sherbrooke-Mont-Mégantic.

Les températures de l'air, l'accumulation et la fonte des neiges ont été simulées et elles sont proches de la réalité de terrain.

Des ajustements sont nécessaires pour permettre d'améliorer les simulations. Un délai entre les précipitations simulées et réelles illustre que les systèmes météorologiques n'arrivent pas en même temps à la station météorologique de Sherbrooke et au Mont-Mégantic. La durée de ce délai dépend de la vitesse de déplacement du système météo. Également, certains systèmes résident plus longtemps en secteur montagneux. Ceci peut engendrer des écarts de précipitations pour certains événements météorologiques. A ce sujet, il faut préciser que le ratio de précipitation entre Sherbrooke et le sommet du Mont-Mégantic est une moyenne pour une saison hivernale complète. Chaque précipitation a un ratio spécifique.

Une station météorologique en montagne permettrait d'estimer le ratio entre une station en basse altitude et une autre en haute altitude pour chaque événement. En l'absence d'une telle station, des images radars permettraient d'estimer le type et la quantité des précipitations.

Lors de la saison hivernale 2006-2007, les quantités de neige accumulées au sol sont bien représentées durant la période d'accumulation de la neige aux lieux d'étude sauf en début et fin de saison pour la position Mégantic. Ceci semble indiquer une surestimation des précipitations pour certains systèmes météorologiques à Mégantic. Un mauvais partage des précipitations pourrait également occasionner ces différences. D'ailleurs, une fonte accélérée pour toutes les positions durant l'hiver 2006-2007 semble indiquer que les précipitations de

pluie soient responsables de la fonte des neiges. Ceci peut différer de la réalité du terrain en raison des processus d'interception par la végétation.

Les mauvaises estimations des précipitations sont fréquentes lorsque la température de l'air est proche du point de congélation. Il est possible que la précipitation soit de la pluie alors que le modèle prédit de la neige. Ceci se produit fréquemment durant toute la saison hivernale. Comme les précipitations sont plus fortes en début et fin de saison, les chutes de neige sont surestimées durant ces périodes.

Généralement, les paramètres des quantités de précipitations de la saison hivernale 2006-2007 ressemblent à ceux de 2007-2008 ; par contre, les simulations 2007-2008 s'améliorent en ajustant les paramètres de la quantité des précipitations. Ces ajustements sont de l'ordre de 40%. Ceci semble compenser les erreurs d'estimation de températures.

Durant la saison 2006-2007, de fortes précipitations ont été observées lors d'événements ponctuels. À l'opposé, lors de la saison 2007-2008, les systèmes météorologiques ont apporté de nombreuses précipitations de faible intensité. Il est possible que les estimations de températures en montagne diffèrent lors d'une année El Nino (2006-2007) versus une année La Nina (2007-2008). À ce sujet, il serait recommandé d'appliquer un gradient de température distinct pour chaque année.

Les paramètres de facteurs de fonte et des délais de la fonte ont été calculés pour la saison hivernale 2006-2007 et appliqués pour les simulations des deux hivers. Ceux-ci ont été considérés constants, mais il est possible qu'ils varient de manière spatio-temporelle. Il semble que la pluie a été un facteur prédominant dans la fonte, puisque la fin de la présence de neige aux points d'études correspond bien, même si les paramètres sont constants.

Les paramètres de la compaction du manteau nival n'ont pu être établis à partir des données de terrain. Les paramètres proviennent d'études antérieures, car les données de température recueillies par les senseurs à neige ne couvrent pas toute la saison hivernale. Il est difficile de connaître l'impact réel de ce paramètre sur les estimations d'épaisseur de neige.

En milieu ouvert, les écarts provenant du modèle augmentent lorsque comparés au milieu forestier. Les observations suggèrent que les différences obtenues sont dues aux mauvaises estimations de radiation et de transport de neige.

Il est observé que les processus de transport de neige par le vent, d'interception par la végétation, de sublimation, d'absorption par le sol, de suivi de l'eau liquide et de la vapeur d'eau dans le manteau neigeux, des changements d'albédo de la neige peuvent être ajoutés au modèle existant pour permettre des raffinements supplémentaires. Cependant, en l'absence d'équipements adéquats pour obtenir convenablement les données pouvant alimenter un modèle complexe, il est préférable d'utiliser un modèle simple ayant peu d'entrées. Ce modèle est une première étape vers la construction d'un Système d'Information Géographique de la couverture de neige de l'Estrie (région du Mont-Mégantic).

Ce modèle peut s'extrapoler à l'ensemble du Québec en utilisant plusieurs stations météorologiques disponibles sur l'ensemble du territoire. Également, il peut s'appliquer à des territoires qui n'ont pas de stations météorologiques à proximité. Il est nécessaire d'obtenir des estimations continues des paramètres entrants dans le modèle soit à l'aide d'équipements sur le terrain ou des données de température du sol et des précipitations obtenues par satellite. Dans tous ces cas, il est nécessaire d'intégrer dans le Système d'Information Géographique plusieurs paramètres tels que la longitude, la latitude, l'élévation, la pente, l'orientation de la pente. Ces modèles peuvent être jumelés avec les modèles climatiques régionaux et globaux. Le jumelage avec des modèles du sol ou de l'atmosphère peut être effectué lorsque les gradients de température du sol et de l'atmosphère sont connus.

### Références

- Adam, J.C., Haddeland, I., Su, F. and Lettenmaier, D.P. (2007) Simulation of reservoir influences on annual and seasonal streamflow changes for the Lena, Yenisei, and Ob' rivers. *Journal of Geophysical Research-Part D-Atmospheres*, vol. 112, p. 24114-1.
- Adams, W.P. (1981) Snow: plants and animals. Chap.1, Section 2, p.13-26 *In* Gray, D.M. and Male, D.H. (réd.) Handbook of Snow. Wiley, New York, 776 p.
- Anderson, E.A. (1973) Snow accumulation and ablation model. U.S.Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, NOAA tech. Memo, NWS HYDRO-17, Washington, 217 p.
- Anderson, E.A. (1976) A point energy and mass balance model of a snow cover, U.S.Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, NOAA technical report NWS19, Washington, 150 p.
- Anderton, S.P., White, S.M., Alvera, B. (2004) Estimation of spatial variability in snow water equivalent for high mountain catchment. *Hydrological Processes*, vol. 18, p.435-453.
- Andreadis, K.M., Liang, D., Tsang, L., Lettenmaier, D.P., Josberger, E.G. (2008). Characterization of errors in a coupled snow hydrology; microwave emission model. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, n° 1, p.149-164.
- Andreadis, K.M., Storck, P. et Lettenmaier, D.P. (2009). Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments. *Water Resources Research*, vol. 45, n° 5, p.1-13.
- Bennis, S., Brunelle, P.E. (1989). Modèle d'évolution du manteau nival et de la fonte des neiges. *Canadian Journal Civil Engineering*, vol. 16, p.219-226.
- Bloschl, G. (1999) Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological Processes*, vol. 13, p.2149-2175.

Bugnion, V., Stone, P.H. (2002). Snowpack model estimates of the mass balance of the Greenland ice sheet and its changes over the twenty-first century. *Climate Dynamics*, vol. 20, n° 1, p. 87-106.

Carroll, T.R., Larson, L.W. (1981). Application of airborne gamma radiation snow survey measurements and snow cover modeling in river and flood forecasting. In Anonyme, *Proceedings of the Western Snow Conference* (p. 23-33), 49th Annual Meeting. St George, UT, USA, West Snow Conf. Available from Soil Conserv Serv.

Carroll, T., Cline, D., Fall, G., Nilsson, A., Li, L. et Rost, A. (2001). NOHRSC operations and the simulation of snow cover properties for the coterminous U.S. In Anonyme, *69th Annual Meeting Western Snow Conference* (p. 1-10), Apr 16 - 19 2001. Sun Valley, ID, United states, National Resources Conservation Service.

Centre Information Topographique (2003) Données numérique élévation du Canada, Sherbrooke (Canada), <http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/cded/index.html>  
Consulté le 19 septembre 2008.

Centre National de Recherche Météorologiques (2003) SnowMIP : Snow Model Intercomparison Project, St Martin d'Hères (France), <http://www.cnrm.meteo.fr/snowmip/>  
Consulté le 25 février 2008.

Chang, K.T. and Zhaoxing, L.(2000) Modelling snow accumulation with a geographic information system. *International Journal of Geographical Information Science*, vol.14, n° 7, p. 693-707.

Chokmani, K., Bernier, M., Slivitzky, M. (2006). Suivi spatio-temporel du couvert nival du Québec à l'aide des données NOAA-AVHRR. *Journal of Water Science*, vol. 19, n° 3, p. 163-179.

Colbeck, S.C. (1980) Thermodynamics of snow metamorphism due to variations in curvature, *Journal of Glaciology*, vol. 26, no. 94, p. 291-300.

Colbeck, S.C. (1989a) Snow-crystal growth with varying surface temperature and radiation penetration, *Journal of Glaciology*, vol.35, no.119, p. 23-29.

Colbeck, S.C. (1989b) Air movement in snow due to windpumping, *Journal of Glaciology*, vol.35, no.120, p. 209-213.

Cooley, K.R. et Robertson, D.C. (1985). Determining variability of snow accumulation and ablation on western rangelands. In Anonyme, *Proceedings of the Western Snow Conference* (p. 156-159), Fifty-Third Annual Meeting. Boulder, CO, USA, Colorado State Univ.

De Sève, D., Evora, N.D., Tapsoba, D. (2007) Comparison of three algorithms for estimating Snow Water Equivalent (SWE) over La Grande River watershed using SSM/I data in the context of Hydro-Québec's hydraulic power management. *IEEE*.

Dong, J., Walker, J.P., Houser, P.R. (2005). Factors affecting remotely sensed snow water equivalent uncertainty. *Remote Sensing of Environment*, vol.97, p. 68-82.

Dressler, K.A., Leavesley, G.H., Bales, R.C. et Fassnacht, S.R. (2006). Evaluation of gridded snow water equivalent and satellite snow cover products for mountain basins in a hydrologic model. In Anonyme, *Eastern Snow Conference/ Western Snow Conference* (p. 673-688), John Wiley and Sons Ltd.

Drogue, G.1., Humbert, J., Deraisme, J., Mahr, N. et Freslon, N. (2002). A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *International Journal of Climatology*, vol. 22, n° 5, p. 599-613.

Dyurgerov, M.B. (1985). Forecasting glacial sources. *Priroda*, n° 2, p. 47-59.

Dyurgerov, M.B., Mikhalenko, V.N., Kunakhovitch, M.G., Ushnurtsev, S.N., Chaohai, L. et Zichu, X. (1994). On the cause of glacier mass balance variations in the Tian Shan mountains. *GeoJournal*, vol. 33, n° 2-3, p. 311-17.

Essery, R., Barr, A., Gustafsson, D., Stahli, M., Thompson, E., Suzuki, K. (2005) SnowMIP2. Commission Science Cryosphere, Exeter, England,  
<http://xweb.geos.ed.ac.uk/ressery>  
 Consulté le 21 avril 2009.

Essery, R., Martin, E., Douville, H., Fernandez, A., Brun, E. (1999) A comparison of four snow models using observations from alpine site. *Climate Dynamics*, vol.15, p.583-593.

European Center for Median-range Weather Forecast (2008) Numerical Weather Prediction Parametrization of diabatic processes. Reading, Angleterre.  
[www.ecmwf.int/newsevents/raining/meteorological\\_presentations/ppt/PA/moist\\_intro.ppt](http://www.ecmwf.int/newsevents/raining/meteorological_presentations/ppt/PA/moist_intro.ppt)  
 Consulté le 30 décembre 2008.

Fernandes, R. and Zhaoy, H. (2009) Observed Controls on the Northern Hemisphere Snow-Albedo Feedback. Eastern Snow Conference, Niagara, 9-11 juin 2009.

Fierz, C. and Lehning, M. (2001). Assessment of the microstructure-based snow-cover model SNOWPACK: thermal and mechanical properties. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 33, n° 2-3, p. 123-131.

Garen, D. C. and Marks, D. (2005). Spatially distributed energy balance snowmelt modelling in a mountainous river basin: Estimation of meteorological inputs and verification of model results. *Journal of Hydrology*, vol. 313, p.126-153.

Goodrich, L. (1976) A numerical model for assessing the influence of snow cover on the ground thermal regime, Thèse de doctorat présentée à McGill University, Interdisciplinary programme in Glaciology, 538 p.



Gray, D.M. and Male, D.H. (1981) Snowcover ablation and runoff. Chap. 9, p. 360-436. *In* Gray, D.M. and Male, D.H. (réd.) (1981) Handbook of Snow. Wiley, New York, 776 p.

Granberg, H.B. (1973) Indirect Mapping of the Snow Cover for Permafrost Prediction at Schefferville, Quebec. Proceedings: Second International Conference on Permafrost, p. 113-120, Washington, D.C., National Academy of Sciences.

Granberg, H.B., Cliche, P. Mattila, O.P., Kanto, E., Lepparanta, M. (2009) A snow sensor experiment in Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of Glaciology*, vol.55, no.194, p.1041-1051.

Greene, E.M., Liston, G.E., Pielke, R.A. (1999). Simulation of above treeline snowdrift formation using a numerical snow-transport model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 30, p. 135-144.

Gustafsson, D., Stahli, M., Jansson, P.E. (2001) The surface energy balance of a snow cover: comparing measurements to two different simulations models. *Theoretical and applied Climatology*, vol. 70, p. 81-96.

Hellstrom, R. (2009) Sensibility Analysis of Snow Processes in the Forest: UEBMOD Snow Model: SnowMIP2. Eastern Snow Conference, Niagara, 9-11 juin 2009.

Huang, H.C., Cressie, N. (1996). Spatio-temporel prediction of snow water equivalent using the Kalman filter. *Computational Statistics and Data Analysis*, vol.22, p.159-175.

Lehning, M and Bartelt, P. (2002a) A physical snowpack model for the swiss avalanche warning part I : numerical model, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, p. 123-145.

Lehning, M and Bartelt, P. (2002b) A physical snowpack model for the swiss avalanche warning part II : snow microstructure, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, p. 147-167.

Lehning, M and Bartelt, P. (2002c) A physical snowpack model for the swiss avalanche warning part III : meteorological forcing thin layer formation and evaluation, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, p. 169-184.

Libbrecht, K. (2007) The formation of snow crystals, *American Scientist*, vol.95, no. 1, p. 52-59.

Liston, G. E. and Sturm, M. (1998) A snow transport model for complex terrain. *Journal of Glaciology*, vol.44, p. 498-516.

Liston, G.E., Haehnel, R.B., Sturm, M., Hiemstra, C.A., Berezovskaya, S., Tabler, R.D. (2007) Simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D. *Journal of Glaciology*, vol. 53, n°181, p. 241-256.

Lopez Moreno, J.I. and Noguès-Bravo, D. (2006) Interpolating snow depth data : An evaluation of methods. *Hydrological Processes*, vol. 20, p. 2217-2232.

Lundberg, A., Halldin, S. (2001). Snow interception evaporation. Review of measurement techniques, processes, and models. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 70, p.117-133.

Mc Kay, G.A. (1981) Snow and man. Chap.1, Section 1, p.3-13 in Gray, D.M. and Male, D.H. (réd.) (1981) Handbook of Snow. Wiley, New York, 776 p.

Parc National du Mont Mégantic (2008) Le journal du parc.

[http://www.sepaq.com/resources/pdfs/fr/JournalParcMME\\_2008fr.pdf](http://www.sepaq.com/resources/pdfs/fr/JournalParcMME_2008fr.pdf)

Consulté le 24 juillet 2008.

Pomeroy, J.W., Parviainen, J., Hedstrom, N., Gray, D.M.(1998). Coupling modelling of forest snow interception and sublimation. *Hydrological Processes*, vol. 12, p. 2317-2337.

Prévost, M., Barry, R., Stein, J., Plamondon, A.P. (1989). Évolution du couvert de neige et des profils hydriques et thermique du sol dans un bassin de la sapinière laurentienne. *Journal of Hydrology*, vol.107, no.1-4, p.343-366.

Ressources Naturelles Canada (2008). Geogratias. Sherbrooke, Québec, Canada, [www.geogratias.cgdi.gc.ca](http://www.geogratias.cgdi.gc.ca) Consulté 8 juillet 2008.

Roberge, J., Stein, J., Plamondon, A. (1988). Évaluation d'un modèle de fonte nivale en forêt boréale. *Journal of Hydrology*, vol. 97, p.161-179.

Rutter, N., Essery, R., Pomeroy, J., Altimir, N., Andreadis, K., Baker, I., Barr, A., Bartlett, P., Boone, A., Deng, H., Douville, H., Dultra, E., Elder, K., Ellis, C., Feng, X., Gelfan, A., Goodbody, A., Gusev, Y., Gustafsson, D., Hellstrom, R., Hirabayashi, Y., Hirota, T., Jonas, T., Koren, V., Kuragina, A., Lettenmaier, D., Li, W-P., Luce, C., Martin, E., Nasonova, O., Pumpanen, J., Pyles, R.D., Samuelsson, P., Sandells, M., Schadler, G., Shmakin, A., Smimova, T.G., Stahli, M., Stockli, R., Strasser, U., Su, H., Suzuki, K., Takata, K., Tanaka, K., Thompson, E., Vesala, T., Viterbo, P., Wiltshire, A., Xia, K., Xue, Y., Yamazaki, T. (2009) Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *Journal of Geophysical research* **114**: D06111.

Schaerer, P.A. (1981) Avalanches. Chap.11, p.475-518 in Gray, D.M. and Male, D.H. (éd.) (1981) Handbook of Snow. Wiley, New York, 776 p.

Schemenauer, R.S., Berry, M.O., Maxwell, J.B. (1981) Snowfall formation. Chap.4. p.129-151 in Gray, D.M. and Male, D.H. (éd.) (1981) Handbook of Snow. Wiley, New York, 776 p.

Shimamura, Y., Izumi, T., Matsuyama, H. (2006). Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n° 21, p. 4867-4884.

SIEF : Système d'Information Écoforestière (2003). Ministère des ressources naturelles. Charlesbourg, Québec, Canada,

[www.collections.banq.qc.ca/ark:/52327/4423](http://www.collections.banq.qc.ca/ark:/52327/4423)

Consulté le 30 janvier 2009.

Tait, A.B., Hall, D.K., Foster, J.L., Chang, A.T. et Armstrong, R.L.(2000) Utilizing multiple datasets for snow cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, vol.72, p.111-126.

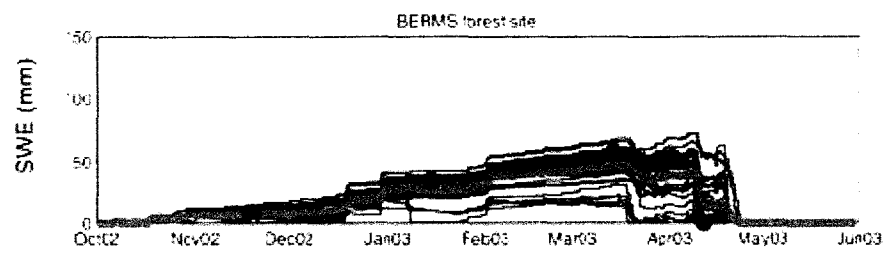
Tapsoba, D., Fortier, V., Anctil, F., Haché, M. (2005) Apport de la technique de krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau, *Canadian Journal Civil Engineering*, vol.32, p.289-297.

Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., Villeneuve, J.P. (2004). Prévion hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Canadian Journal Civil Engineering*, vol.31, p.308-320.

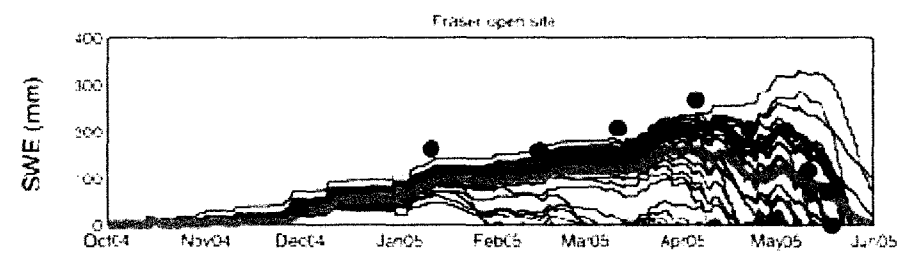
Winstral, A. and Marks, M. (2002) Simulating wind field and snow redistribution using terrain based parameters to model snow accumulation and melt over a semi-arid mountain catchments. *Hydrological Processes*, vol. 16, p. 3585-3603.

Annexes

Annexe 1 : Comparaison des modèles de neige



Comparaison des modèles de neige existants au site forestier Canadien Berms (Latitude 53°55 Nord, Longitude 104°42 Ouest) pour la période hivernale 2002-2003. (Rutter et al, 2009)



Comparaison des modèles de neige existants au site zone ouverte Américain Fraser (Latitude 39°53 Nord, Longitude 105°53 Ouest) pour la période hivernale 2004-2005. (Rutter et al, 2009)

**Annexe 2 : Identification de 10 modèles de neige participant à Snowmip2 (Rutter et al., 2009)**

| Modèle de neige | Identificateur                                  | Référence                  |
|-----------------|---|----------------------------|
| 2LM             | 2LM   | Yamazaki et al., 2004      |
| CLM2-TOP        | CLI   | Bonan et al., 2002         |
| CoupModel       | COUP  | Gustafsson et al.,<br>2006 |
| CRHM            | CRH   | Pomeroy et al., 2007       |
| JULES           | JUL   | Blyth et al., 2006         |
| RCA             | RCA   | Samuelsson et al.,<br>2006 |
| SNOW-17         | S17   | Anderson, 1973,<br>1976    |
| SAST            | SAS   | Sun and Xue, 2001          |
| SiB 2.5         | SB2   | Baker et al., 2003         |
| SiB 3.0         | SB3   | Baker et al., 2003         |
| Total           | 10 des 33 modèles<br>participants à<br>Snowmip2 |                            |

### Annexe 3 : Caractéristiques techniques de 10 modèles de neige participant à Snowmip2

(Essery et al, 2005)

## CL

## MODÈLE

2LM I COU CRH JUL RCA S17 SAS SB2 SB3

## Application principales du modèle

[illegible]

## CL

## MODÈLE

**2LM I COU CRH JUL RCA S17 SAS SB2 SB3**

## 1. PROCÉDÉS VÉGÉTATION

### 1.1 Modèle multicouche végétal et sol ?

|  |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
|  | x | x | x | x | x | x |  | x | x | x |
| Combien de couches pour la végétation? | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |  | 1 | 1 | 1 |

\*Le nombre de couches est ajustable

## 1.2 Base théorique pour transmission radiation ondes courtes?

|                                |   |   |   |   |  |   |  |   |   |
|--------------------------------|---|---|---|---|--|---|--|---|---|
| Pas transmission ondes courtes |   |   |   | x |  |   |  |   |   |
| Loi de Beer                    |   |   | x | x |  | x |  |   |   |
| Approximation rétroactif       | x | x |   |   |  |   |  | x | x |
| Autre?                         |   |   |   |   |  |   |  |   |   |

**Annexe 3 : Caractéristiques techniques des modèles de neige sélectionnés au tableau 1 (suite)**

1).

CL

## MODÈLE

**2LM I COU CRH JUL RCA S17 SAS SB2 SB3**

### 1.3 Facteurs affectant transmission albedo?

[illegible]

\* Fraction couvert nival

### 1.4 Dépendance albedo de végétation?

[illegible]

\* Albedo du sol en-dessous de la végétation



Annexe 3 : Caractéristiques techniques des modèles de neige sélectionnés au tableau 1 (suite 2)

| MODÈLE | CL  |   |     |     |     |     |         |
|--------|-----|---|-----|-----|-----|-----|---------|
|        | 2LM | I | COU | CRH | JUL | RCA | S17 SAS |

1.5 Réflexions multiples entre le sol et la végétation?

|  |  |  |   |  |  |  |   |
|--|--|--|---|--|--|--|---|
|  |  |  | x |  |  |  | x |
|--|--|--|---|--|--|--|---|

1.6 Théorie transmission radiation ondes longues?

Pas transmission ondes longues

|  |   |  |  |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|--|--|
|  | x |  |  |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|--|--|

loi de Beer

|  |  |   |  |   |   |  |  |
|--|--|---|--|---|---|--|--|
|  |  | x |  | x | x |  |  |
|--|--|---|--|---|---|--|--|

Approximation deux écoulements

|   |  |  |   |  |  |  |   |
|---|--|--|---|--|--|--|---|
| x |  |  | x |  |  |  | x |
|---|--|--|---|--|--|--|---|

Autre?

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|

1.7 Quel valeur pour émission ondes longues de végétation?

|   |   |   |   |   |   |  |  |
|---|---|---|---|---|---|--|--|
| 1 | * | 1 | # | 1 | # |  |  |
|---|---|---|---|---|---|--|--|

$*E_v=1-\exp(-(L+S))$

1.8 Quantités affectés par radiation ondes longues sous la végétation?

Température peau de végétation

|   |   |   |  |   |  |  |  |
|---|---|---|--|---|--|--|--|
| x | x | x |  | x |  |  |  |
|---|---|---|--|---|--|--|--|

Température de masse de végétation

|  |  |   |   |  |   |  |   |
|--|--|---|---|--|---|--|---|
|  |  | x | x |  | x |  | x |
|--|--|---|---|--|---|--|---|

Radiation ondes longues au dessus de la végétation

|   |   |   |   |  |   |  |   |
|---|---|---|---|--|---|--|---|
| x | x | x | x |  | x |  | x |
|---|---|---|---|--|---|--|---|

Index zone de feuilles

|   |   |   |  |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|---|--|---|
| x | x | x |  | x | x |  | x |
|---|---|---|--|---|---|--|---|

Fraction ouverture de ciel

|   |  |   |   |  |   |  |  |
|---|--|---|---|--|---|--|--|
| x |  | x | x |  | x |  |  |
|---|--|---|---|--|---|--|--|

Fermeture de végétation

|  |   |   |   |  |  |  |  |
|--|---|---|---|--|--|--|--|
|  | x | x | x |  |  |  |  |
|--|---|---|---|--|--|--|--|

Autre?

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|

Annexe 4 : Caractéristiques des modèles de neige participant à snowmip1 (Centre National de Recherche Météorologiques, 2003)

| Modèle | Multi-couche | Modèle Sol | Coefficient convectif | Densité variable | Emmagasine eau |
|--------|--------------|------------|-----------------------|------------------|----------------|
|--------|--------------|------------|-----------------------|------------------|----------------|

|           |     |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| ACASA     | OUI | OUI | OUI | OUI |     |
| CLASS     |     | OUI | OUI | OUI |     |
| CLASS-NSD | OUI | OUI | OUI | OUI |     |
| COLA-SSiB |     | OUI | OUI |     |     |
| CROCUS    | OUI |     | OUI | OUI | OUI |
| CSIRO     | OUI | OUI | OUI | OUI |     |
| ESCIMO    |     |     |     |     |     |
| IAP94     | OUI | OUI |     | OUI | OUI |
| INM_SM    |     |     |     | OUI | OUI |
| ISBA-ES   | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| ISBA      |     | OUI | OUI | OUI |     |
| ISO       |     | OUI | OUI |     |     |
| MAPS      | OUI | OUI | OUI | OUI |     |
| MATSIRO   | OUI | OUI | OUI |     |     |
| MOSES     |     | OUI | OUI |     |     |
| NOAH-LSM  |     | OUI | OUI | OUI | OUI |
| SNOW-17   |     |     |     | OUI | OUI |
| SNOWPACK  | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| SNTHERM   | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |
| SPONSOR   |     | OUI | OUI | OUI | OUI |
| SWAP      |     | OUI | OUI | OUI | OUI |
| TSCM      | OUI | OUI |     | OUI | OUI |
| TSCM1     |     |     |     |     | OUI |
| VISA      | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI |

Annexe 5 : Grille d’altitude pour calcul des indices de pente et de profil terrain

|  |  |              |  |  |
|--|--|--------------|--|--|
|  |  | ALT(i , j-2) |  |  |
|  |  | ALT(i , j-1) |  |  |

|             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ALT(i-2 ,j) | ALT(i-1 ,j) | ALT(i ,j)   | ALT(i+1 ,j) | ALT(i+2 ,j) |
|             |             | ALT(i ,j+1) |             |             |
|             |             | ALT(i ,j+2) |             |             |

**Annexe 6 :** Calcul des indices de profil de terrain pour chaque grille d’altitude (Granberg, H.B. 1973)

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
|                                    | Profil de terrain  |
|                                    |  |
| Orientation Ouest-Est où Est-Ouest | $XB = ALT(i ,j) + ( ALT(i ,j) + ALT(i-1 ,j) + ALT(i+1 ,j) )/3$ |
|                                    |  |
| Orientation Ouest-Est où Est-Ouest | $XE = ALT(i ,j) - ( ALT(i ,j) + ALT(i+1 ,j) + ALT(i+2 ,j) )/3$ |
|                                    |  |
| Orientation Sud-Nord où Nord-Sud   | $XB = ALT(i ,j) + ( ALT(i ,j) + ALT(i ,j-1) + ALT(i ,j+1) )/3$ |
|                                    |  |
| Orientation Sud-Nord où Nord-Sud   | $XE = ALT(i ,j) - ( ALT(i ,j) + ALT(i ,j+1) + ALT(i ,j+2) )/3$ |
|                                    |  |

**Annexe 7 :** Calcul des indices de profil de pente pour chaque grille d'altitude

|                                    | Profil de terrain  |
|------------------------------------|--|
|                                    |  |
| Orientation Ouest-Est où Est-Ouest | $XC = ALT(i-1, j) - ( ALT(i-1, j) - ALT(i+1, j) )$                 |
|                                    |  |
| Orientation Ouest-Est où Est-Ouest | $XD = ( ALT(i-1, j) - ALT(i+1, j) ) - ( ALT(i-1, j) - ALT(i, j) )$ |
|                                    |  |
| Orientation Sud-Nord où Nord-Sud   | $XC = ALT(i, j-1) - ( ALT(i, j-1) - ALT(i, j+1) )$                 |
|                                    |  |
| Orientation Sud-Nord où Nord-Sud   | $XD = ( ALT(i, j-1) - ALT(i, j+1) ) - ( ALT(i, j-1) - ALT(i, j) )$ |
|                                    |  |

**Annexe 8 : Données profondeurs de neige aux sites d'étude**

| LOCATION | DATE       | LATITUDE | LONGITUDE | ALT  | PROFONDEUR |
|----------|------------|----------|-----------|------|------------|
|          |            |          |           |      | NEIGE      |
| BASE     | 3-2-2007   | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 50         |
| CHABLIS  | 3-2-2007   | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 60         |
| SOMMET   | 3-2-2007   | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 60         |
| BASE     | 17-2-2007  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 85         |
| CHABLIS  | 18-2-2007  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 115        |
| SOMMET   | 18-2-2007  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 120        |
| BASE     | 5-3-2007   | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 105        |
| CHABLIS  | 4-3-2007   | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 120        |
| SOMMET   | 4-3-2007   | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 120        |
| BASE     | 24-3-2007  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 65         |
| CHABLIS  | 24-3-2007  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 100        |
| SOMMET   | 24-3-2007  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 115        |
| BASE     | 10-4-2007  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 75         |
| CHABLIS  | 10-4-2007  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 130        |
| SOMMET   | 10-4-2007  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 140        |
| BASE     | 21-4-2007  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 65         |
| CHABLIS  | 21-4-2007  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 110        |
| SOMMET   | 21-4-2007  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 165        |
| CHABLIS  | 10-12-2007 | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 60         |
| SOMMET   | 10-12-2007 | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 60         |
| BASE     | 11-1-2008  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 45         |
| CHABLIS  | 12-1-2008  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 70         |
| SOMMET   | 12-1-2008  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 100        |
| BASE     | 7-2-2008   | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 80         |
| CHABLIS  | 8-2-2008   | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 115        |

|         |           |          |           |      |     |
|---------|-----------|----------|-----------|------|-----|
| SOMMET  | 8-2-2008  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 130 |
| BASE    | 26-2-2008 | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 90  |
| CHABLIS | 27-2-2008 | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 165 |
| SOMMET  | 26-2-2008 | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 145 |
| BASE    | 17-3-2008 | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 115 |
| CHABLIS | 18-3-2008 | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 160 |
| SOMMET  | 18-3-2008 | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 185 |
| BASE    | 8-4-2008  | 45.41694 | -71.13056 | 610  | 100 |
| CHABLIS | 7-4-2008  | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 150 |
| SOMMET  | 7-4-2008  | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 195 |
| CHABLIS | 25-4-2008 | 45.45922 | -71.13375 | 790  | 75  |
| SOMMET  | 25-4-2008 | 45.448   | -71.14189 | 1000 | 100 |

Annexe 9 : Densités moyennes

| DENSITE NEIGE    | DATE            | MOYENNE | ÉCART TYPE |
|------------------|-----------------|---------|------------|
| BASE ALT 610M    | 03-févr-07      | 256.38  | 17.85      |
| BASE ALT 610M    | 17-févr-07      | 225.73  | 18.61      |
| BASE ALT 610M    | 06-mars-07      | 249.26  | 16.39      |
| BASE ALT 610M    | 24-mars-07      | 350.69  | 17.84      |
| BASE ALT 610M    | 21-avr-07       | 297.01  | 21.91      |
| BASE ALT 610M    | 11 janvier 2008 | 267.1   | 26.4       |
| BASE ALT 610M    | 07-févr-08      | 225.41  | 26.42      |
| BASE ALT 610M    | 26-févr-08      | 241.94  | 28.83      |
| BASE ALT 610M    | 17-mars-08      | 234.19  | 23.7       |
| BASE ALT 610M    | 08-avr-08       | 227.14  | 33.39      |
| CHABLIS ALT 790M | 03-févr-07      | 285.03  | 26.65      |
| CHABLIS ALT 790M | 17-févr-07      | 226.73  | 18.15      |
| CHABLIS ALT 790M | 03-mars-07      | 285.03  | 26.65      |

|                  |            |        |       |
|------------------|------------|--------|-------|
| CHABLIS ALT 790M | 24-mars-07 | 332.7  | 41.65 |
| CHABLIS ALT 790M | 10-avr-07  | 320.36 | 26.4  |
| CHABLIS ALT 790M | 21-avr-07  | 210.11 | 23.8  |
| CHABLIS ALT 790M | 10-déc-07  | 142.79 | 5.76  |
| CHABLIS ALT 790M | 12-janv-08 | 235.76 | 34.49 |
| CHABLIS ALT 790M | 08-févr-08 | 217.5  | 8.95  |
| CHABLIS ALT 790M | 27-févr-08 | 142.04 | 9.7   |
| CHABLIS ALT 790M | 18-mars-08 | 213.6  | 24.74 |
| CHABLIS ALT 790M | 07-avr-08  | 254.6  | 14.79 |
| CHABLIS ALT 790M | 25-avr-08  | 329.24 | 20.22 |
| SOMMET 1000M     | 02-févr-07 | 300    | 20.24 |
| SOMMET 1000M     | 18-févr-07 | 220.98 | 28.91 |
| SOMMET 1000M     | 04-mars-07 | 260.76 | 25.78 |
| SOMMET 1000M     | 24-mars-07 | 384.07 | 25.63 |
| SOMMET 1000M     | 10-avr-07  | 316.18 | 15.67 |
| SOMMET 1000M     | 21-avr-07  | 237.84 | 20.31 |
| SOMMET 1000M     | 10-déc-07  | 163.97 | 18.34 |
| SOMMET 1000M     | 12-janv-08 | 265.51 | 22.27 |
| SOMMET 1000M     | 08-févr-08 | 227.98 | 24.74 |
| SOMMET 1000M     | 26-févr-08 | 232.48 | 24.56 |
| SOMMET 1000M     | 18-mars-08 | 214.11 | 16.54 |
| SOMMET 1000M     | 07-avr-08  | 249.52 | 18.95 |
| SOMMET 1000M     | 25-avr-08  | 305.29 | 43.91 |

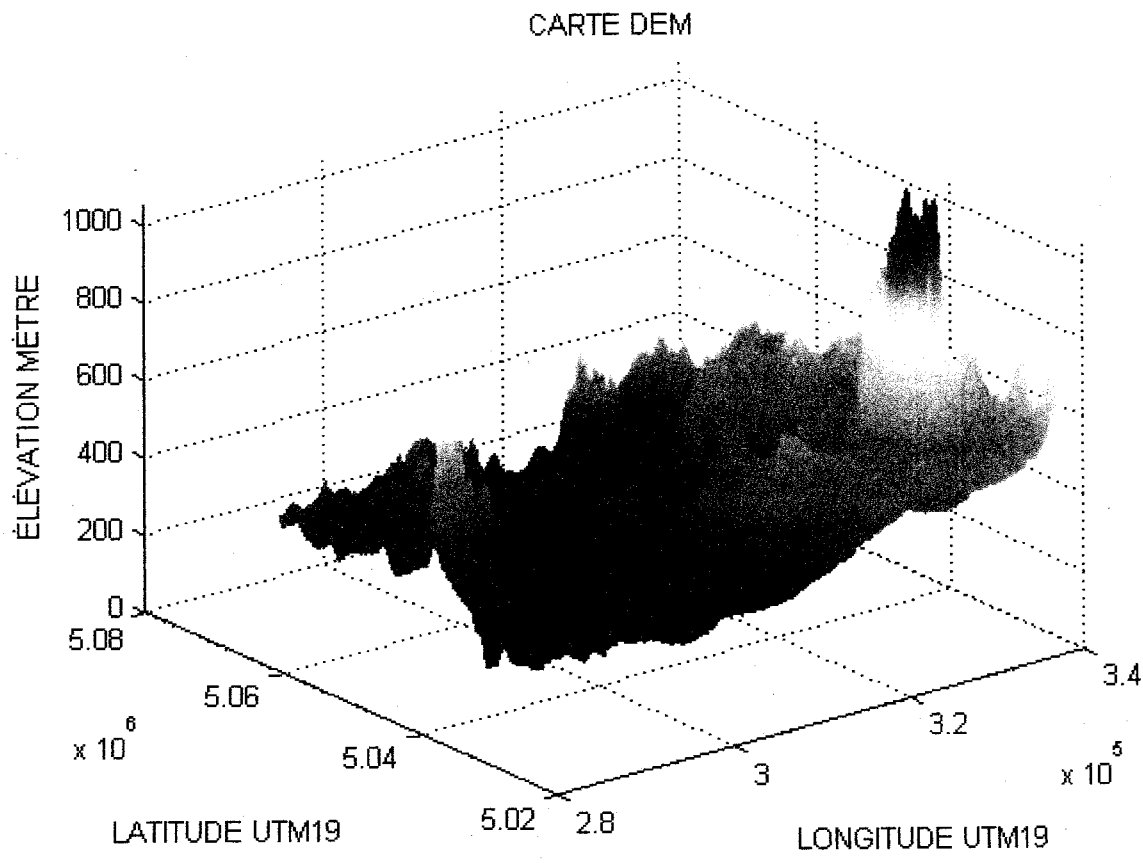
Annexe 10 : Prise des données des senseurs

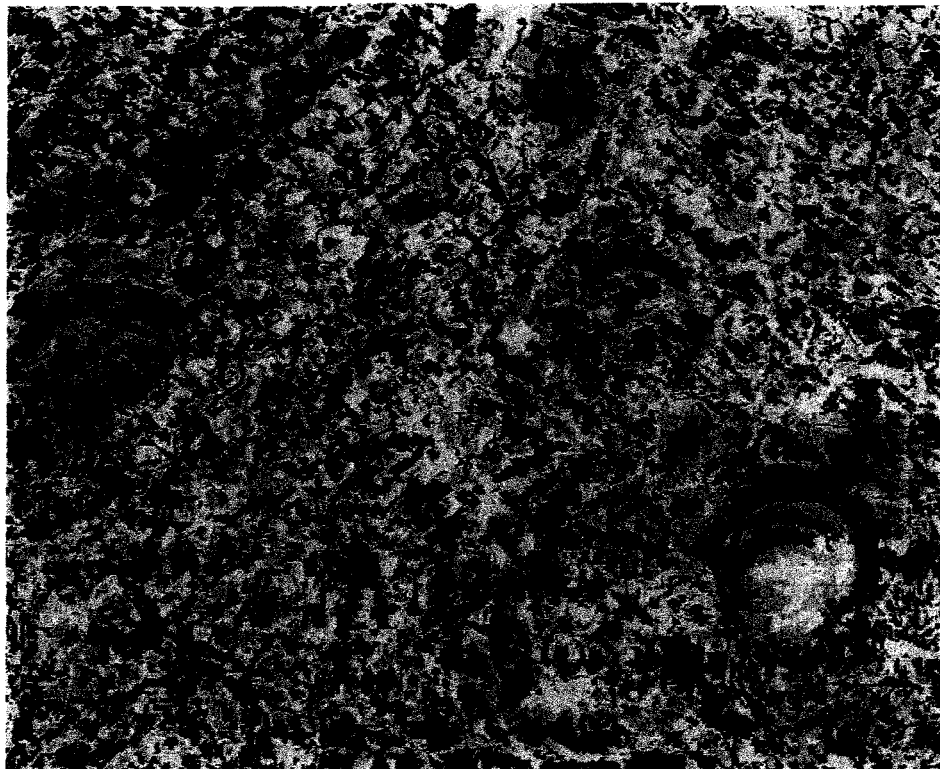
| LOCATION  | PERIODE                       | INTERVALLES<br>DES DONNÉES | LAT   | LONG   | ALT  |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|-------|--------|------|
|           |                               | MIN                        |       |        |      |
| BASE      | 17-1-2007 AU 3-2-2007         | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS   | 18-1-2007 AU 3-2-2007         | 30                         | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET    | 18-1-2007 AU 3-2-2007         | 30                         | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| LA PATRIE | 2-2-2007 AU 16-2-2007         | 30                         | 45.24 | -71.15 | 265  |
| BASE      | 3-2-2007 AU 17-2-2007         | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS   | 3-2-2007 AU 18-2-2007         | 30                         | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET    | 3-2-2007 AU 18-2-2007         | 30                         | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| LA PATRIE | 16-2 AU 7-3-2007              | 30                         | 45.24 | -71.15 | 265  |
| BASE      | 18-2-2007 AU 4-3-2007         | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS   | 18-2-2007 AU 4-3-2007         | 30                         | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET    | 18-2-2007 AU 4-3-2007         | 30                         | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| LA PATRIE | 7-3-2007 AU 25-3-2007         | 30                         | 45.24 | -71.15 | 265  |
| BASE      | PAS DE DONNÉES FILS<br>COUPÉS | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |
|           | 4-3-2007 AU 24-3-2007         |                            |       |        |      |
| CHABLIS   | (DONNÉES<br>CORROMPUES)       | 30                         | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET    | 4-3-2007 AU 24-3-2007         | 30                         | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| LA PATRIE | 25-3-2007 AU 9-4-2007         | 30                         | 45.24 | -71.15 | 265  |
| BASE      | AUCUN                         | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS   | BRANCHEMENT<br>DÉFECTUEUX     | 30                         | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET    | 24-3 AU 10-4-2007             | 30                         | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| LA PATRIE | 9-4-2007 AU 21-4-2007         | 30                         | 45.24 | -71.15 | 265  |
| BASE      | AUCUN                         | 30                         | 45.41 | -71.13 | 610  |







|         |   |    |       |        |      |
|---------|---|----|-------|--------|------|
| CHABLIS | AUCUN                                       | 30 | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET  | 10-4 AU 21-4-2007                           | 30 | 45.44 | -71.14 | 1000 |
|         | 10-12-2007 AU 24-1-2008                     |    |       |        |      |
| BASE    | (POTEAU LA TETE EN HAUT)                    | 60 | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS | 10-12-2007 AU 24-1-2008                     | 60 | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET  | 10-12-2007 AU 20-12-2007 (BATTERIE MORTE)   | 60 | 45.44 | -71.14 | 1000 |
|         | 24-1-2008 AU 22-2-2008                      |    |       |        |      |
| BASE    | (POTEAU LA TETE EN HAUT)                    | 60 | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS | 24-1-2008 AU 22-2-2008                      | 60 | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET  | 8-2-2008 AU 22-2-2008 (INSTALLER 1M DU SOL) | 60 | 45.44 | -71.14 | 1000 |
|         | 22-2-2008 AU 17-3-2008                      |    |       |        |      |
| BASE    | (POTEAU LA TÊTE EN HAUT)                    | 60 | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS | 22-2-2008 AU 17-3-2008                      | 60 | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET  | 22-2-2008 AU 17-3-2008                      | 60 | 45.44 | -71.14 | 1000 |
| BASE    | 17-3-2008 AU 7-4-2008                       | 60 | 45.41 | -71.13 | 610  |
| CHABLIS | BRANCHEMENT DÉFECTUEUX                      | 60 | 45.45 | -71.13 | 790  |
| SOMMET  | BRANCHEMENT DÉFECTUEUX                      | 60 | 45.44 | -71.14 | 1000 |
|         | 7-4-2008 AU 25-4-2008                       |    |       |        |      |
| BASE    | (POTEAU LA TETE EN BAS)                     | 60 | 45.41 | -71.13 | 610  |

Annexe 11 : Le Modèle Numérique Altitude



**Annexe 12 : Le Modèle Numérique Végétation****MODÈLE VÉGÉTATION ESTRIE****Legend**

-  FORÊT FEUILLU/CONIFÈRE
-  FORÊT FEUILLU
-  ZONE AGRICOLE/URBAINE
-  FORÊT CONIFÈRE



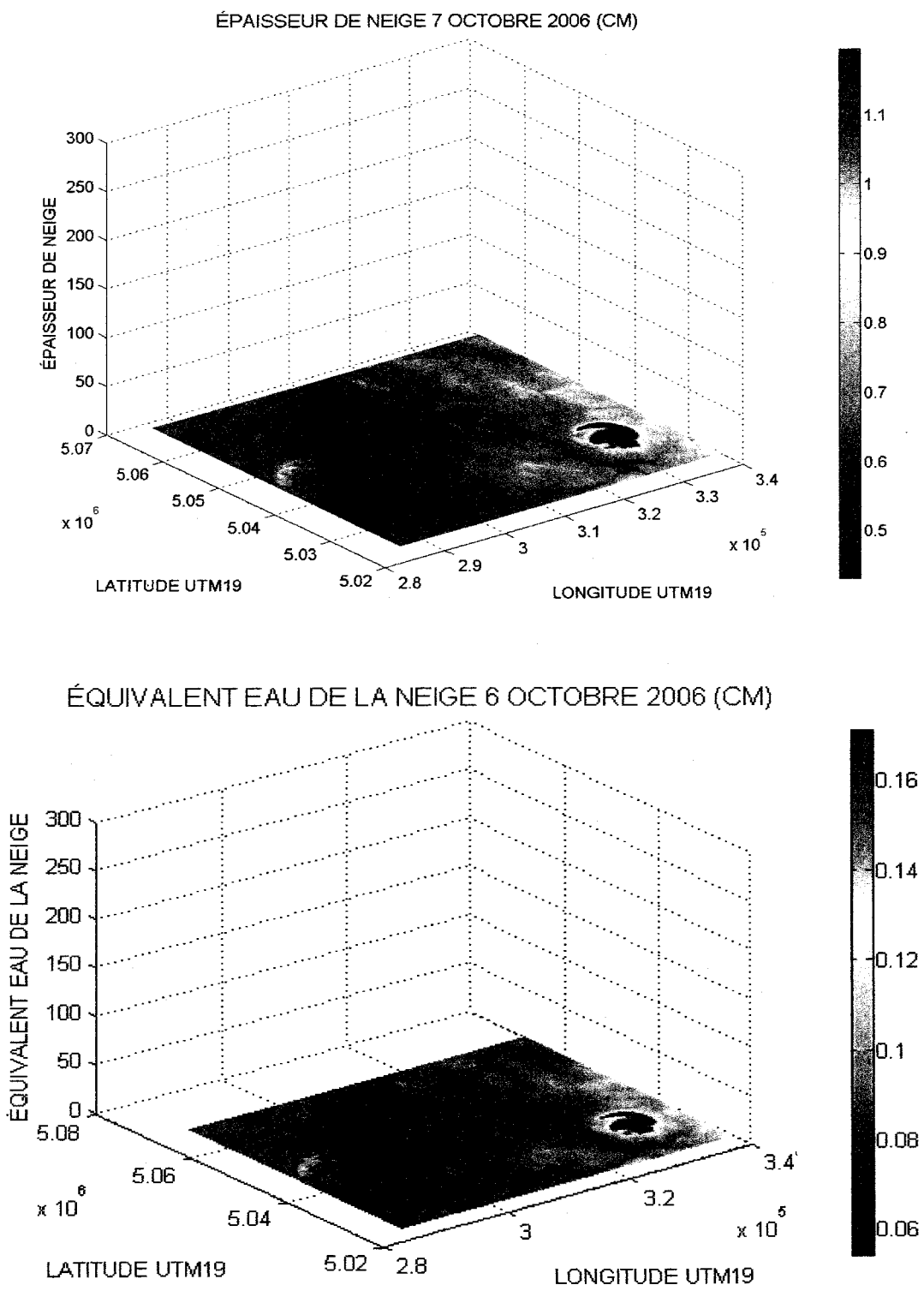
**Annexe 13 :** Calcul du ratio de la quantité de précipitation sur un site d'étude donnée par rapport à celle observée à la station météorologique Environnement Canada de Sherbrooke pour la période hivernale 2006-2007

|                       | PÉRIODE<br>2/2 AU<br>18/2/07 | PÉRIODE<br>2/2 AU<br>4/3/07 | PÉRIODE<br>2/2 AU<br>18/2/07 | PÉRIODE<br>2/2 AU<br>10/4/07 | PÉRIODE<br>2/2 AU<br>21/4/07 | RATIO<br>POSITION/<br>SHERBROOKE |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                       |                              |                             |                              |                              |                              | 328.3/184=                       |
| SOMMET<br>ALT 1000M   | 117.9                        | 180.4                       | 314.3                        | 328.3                        | 234                          | 1.78                             |
|                       |                              |                             |                              |                              | FONTÉ                        |                                  |
| CHABLIS<br>ALT 790M   | 54                           |                             | 78                           | 257                          | 3                            |                                  |
|                       |                              |                             | FONTÉ                        |                              | FONTÉ                        | =91.73/85                        |
|                       | 3/2AU17/2                    | 5/3AU3/2                    |                              |                              |                              | 118.61/85=                       |
| BASE<br>ALT560M       | 75                           |                             | 32                           |                              | 67                           |                                  |
|                       |                              |                             | FONTÉ                        |                              |                              |                                  |
| SHERBROOKE<br>ALT241M | 66                           |                             | 137                          | 184                          |                              |                                  |

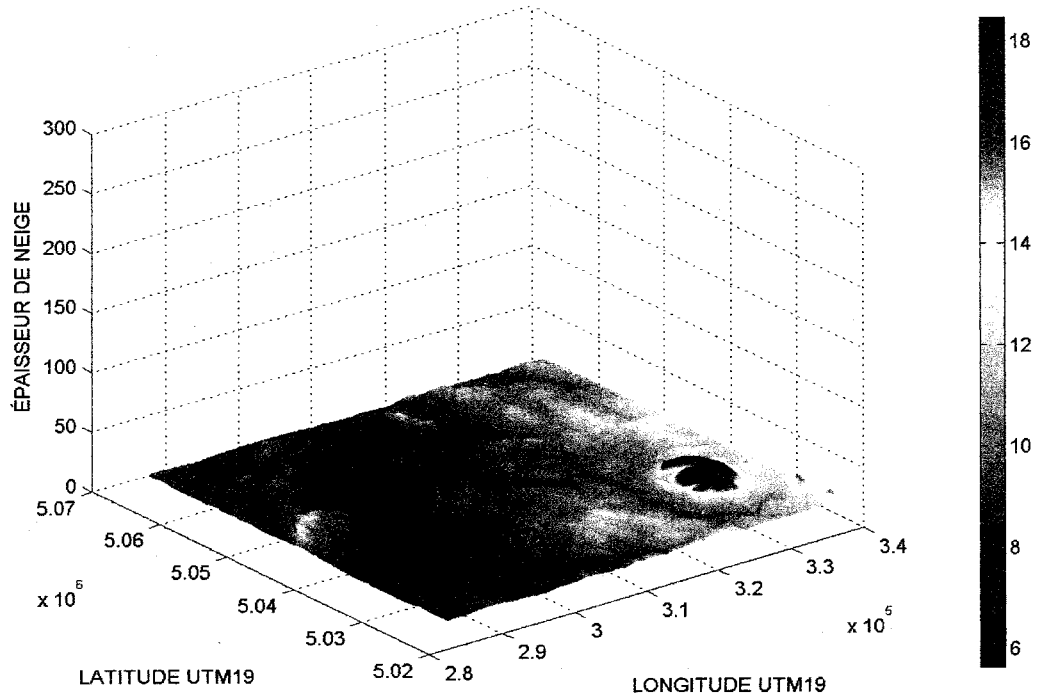
**Annexe 14 :** Calcul du ratio de la quantité de précipitation sur un site d'étude donnée par rapport à celle observée à la station météorologique Environnement Canada de Sherbrooke pour la période hivernale 2007-2008

|            | PÉRIODE  | PÉRIODE   | PÉRIODE   | PÉRIODE  | PÉRIODE  | PÉRIODE  | RATIO      |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|------------|
|            | 10/12/07 | 10/12/07  | 10/12/07  | 10/12/07 | 10/12/07 | 10/12/07 | POSITION/  |
|            | AU       | AU        | AU        | AU       | AU       | AU       | SHERBROOKE |
|            | 12/1/08  | 8/2/08    | 26/2/08   | 18/3/08  | 7/4/08   | 25/4/08  |            |
| SOMMET     | 114.8    | 204       | 230       | 273      | 327      | 210      | 1.71       |
| ALT 1000M  |          |           |           |          |          | FRONTE   |            |
|            |          |           | 27/2/2008 |          |          |          |            |
| CHABLIS    | 67       | 176.44    | 267.5     | 208      | 257      | 165      | 2.54       |
| ALT 790M   |          |           | 51-105    | FRONTE   |          | FRONTE   |            |
| BASE       |          | 7/2AU11/1 |           |          |          |          |            |
| ALT 560M   |          | 48.2      | 131.1     | 161.77   | 126.9    |          | 1.24       |
|            |          |           |           |          | FRONTE   |          |            |
| SHERBROOKE |          | 57        | 100       | 167      | 190.3    |          |            |
| ALT 241M   |          |           |           |          |          |          |            |

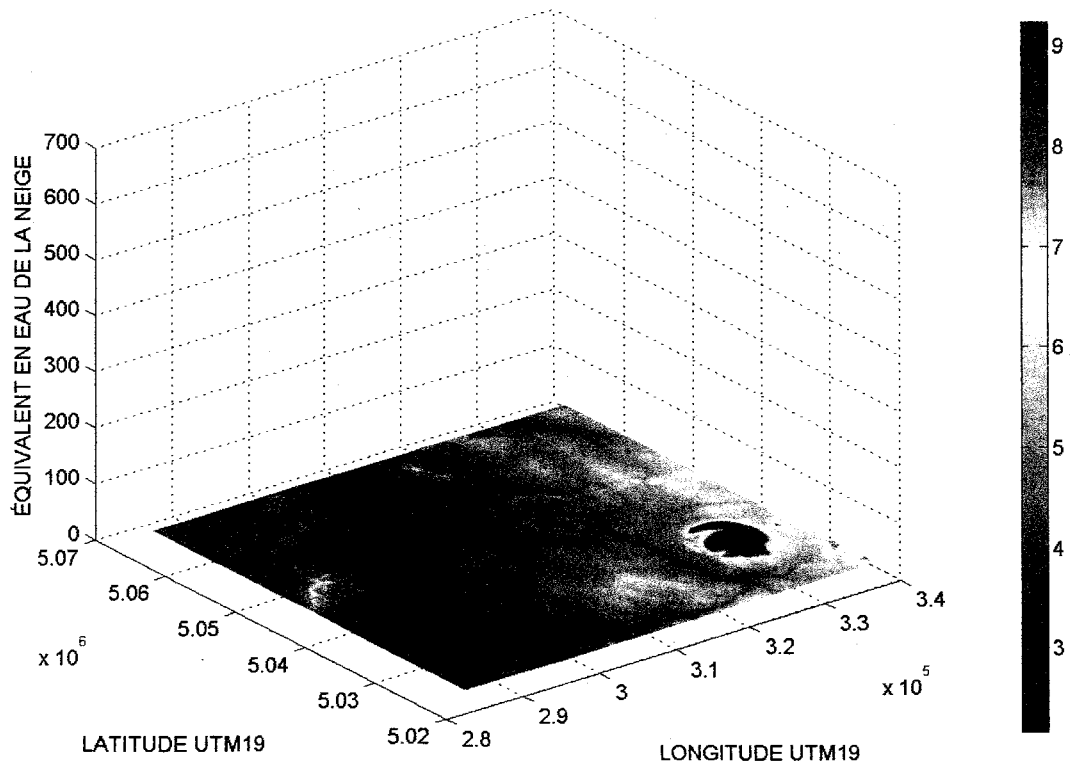
**Annexe 15 :** Cartes épaisseurs et équivalents eau de la neige sur le territoire pour la saison hivernale 2006-2007



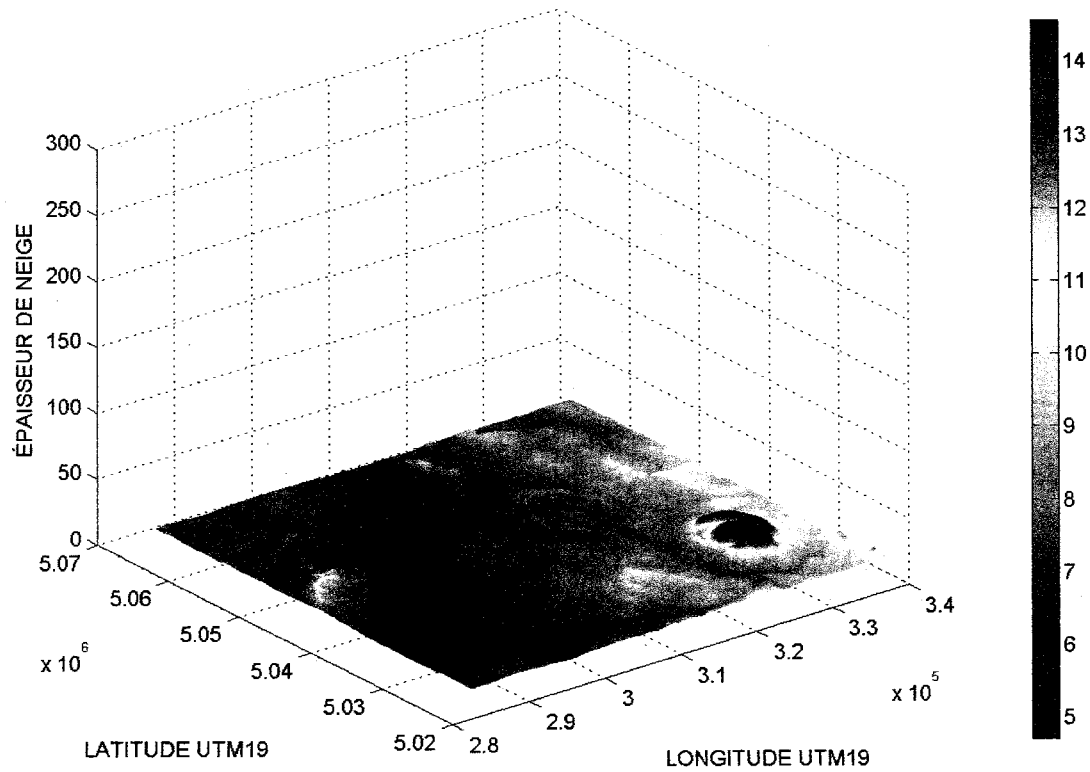
ÉPAISSEUR DE NEIGE 14 OCTOBRE 2006 (CM)



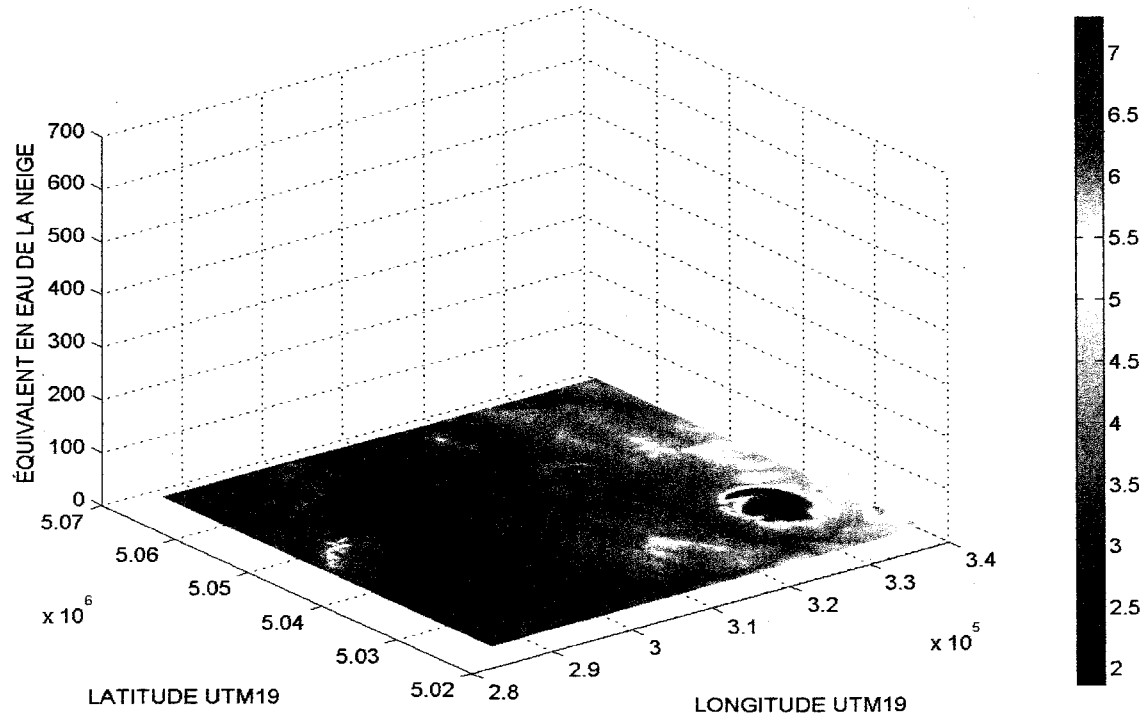
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 14 OCTOBRE 2006 (MM)



ÉPAISSEUR DE NEIGE 28 OCTOBRE 2006 (CM)

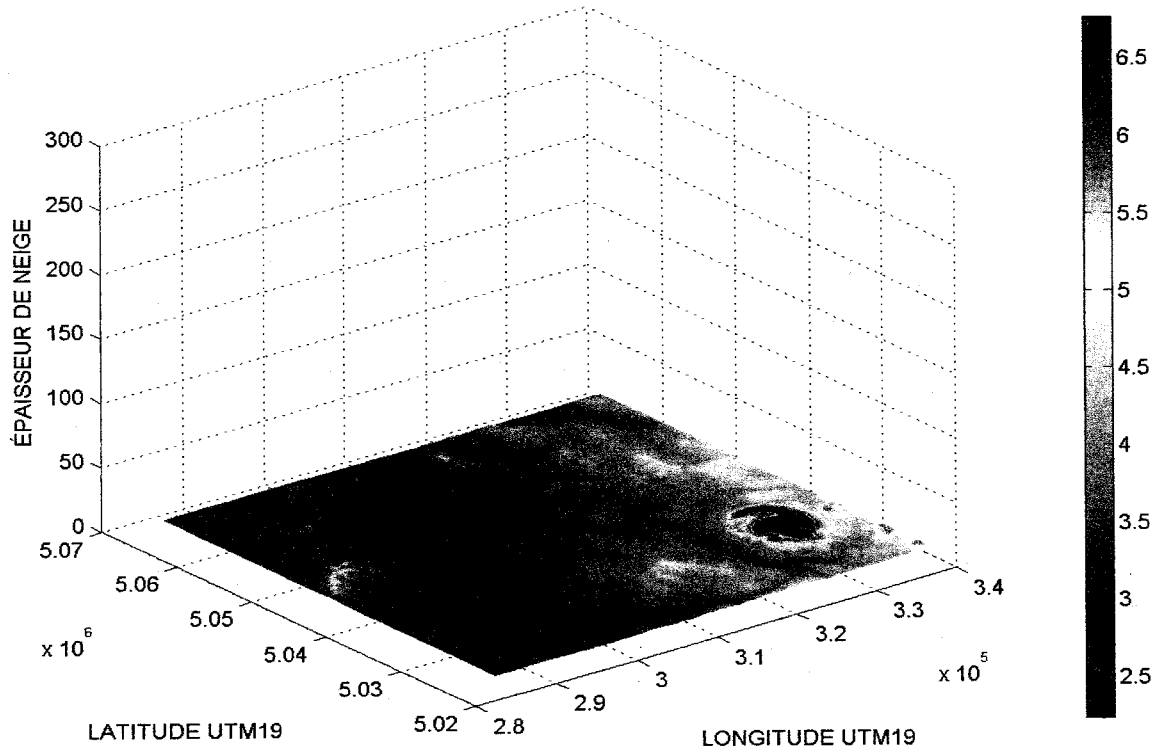


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 28 OCTOBRE 2006 (MM)

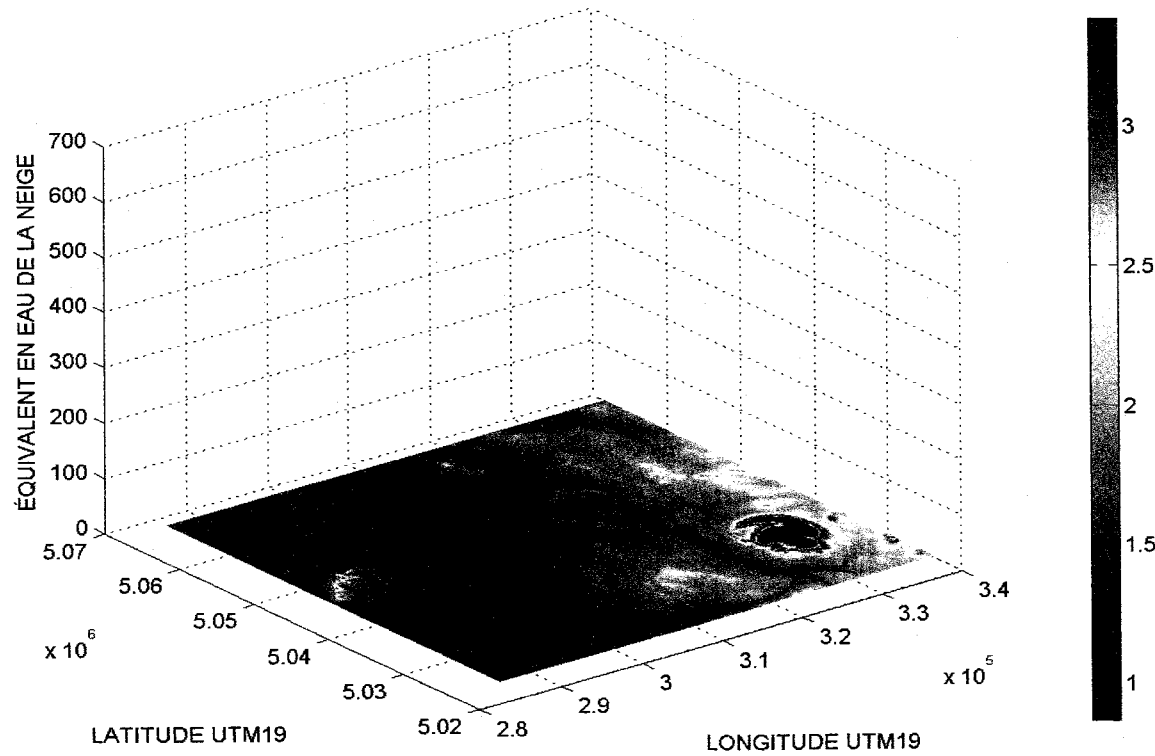




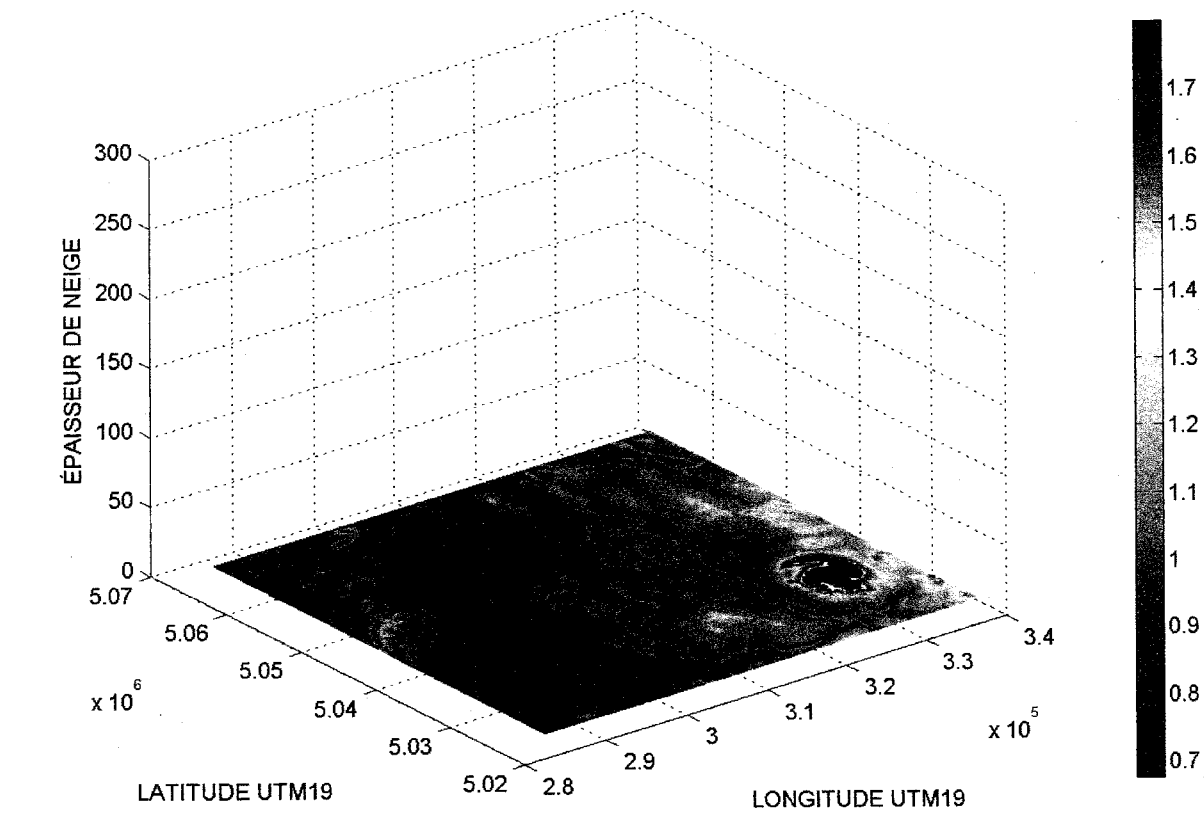
ÉPAISSEUR DE NEIGE 4 NOVEMBRE 2006 (CM)



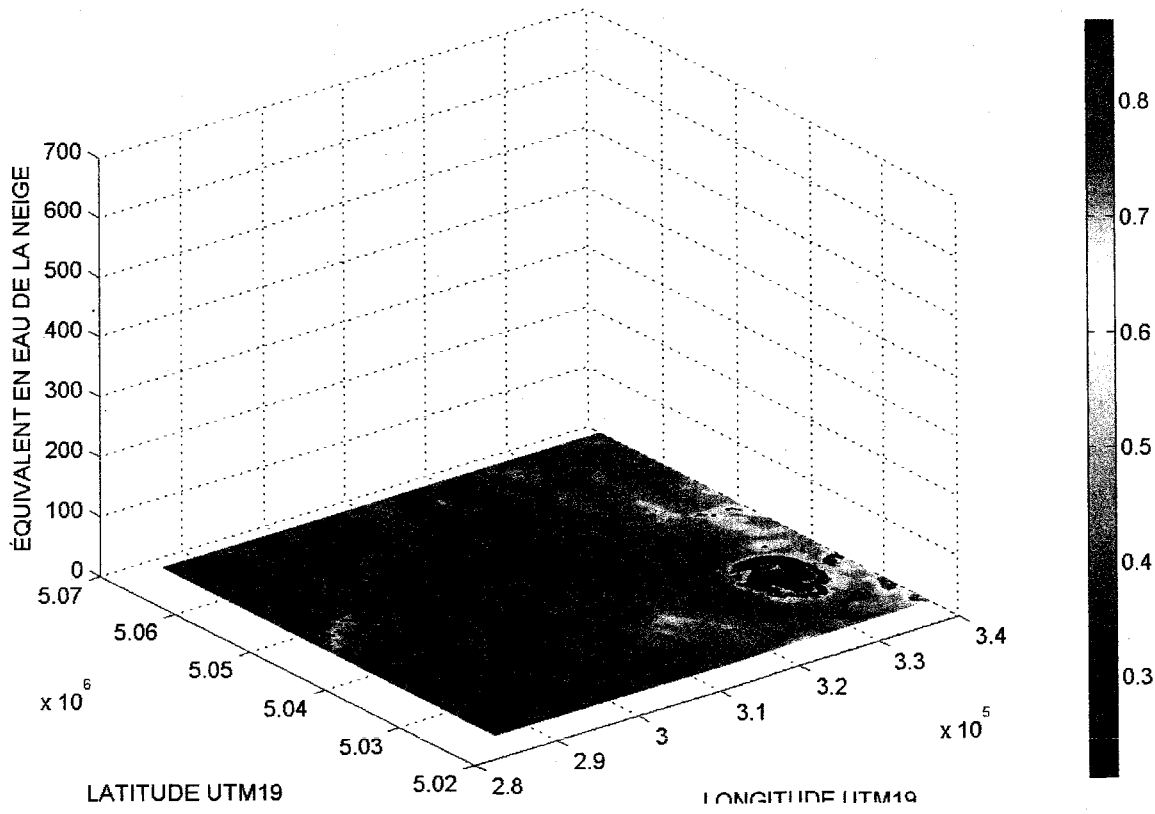
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 4 NOVEMBRE 2006 (MM)

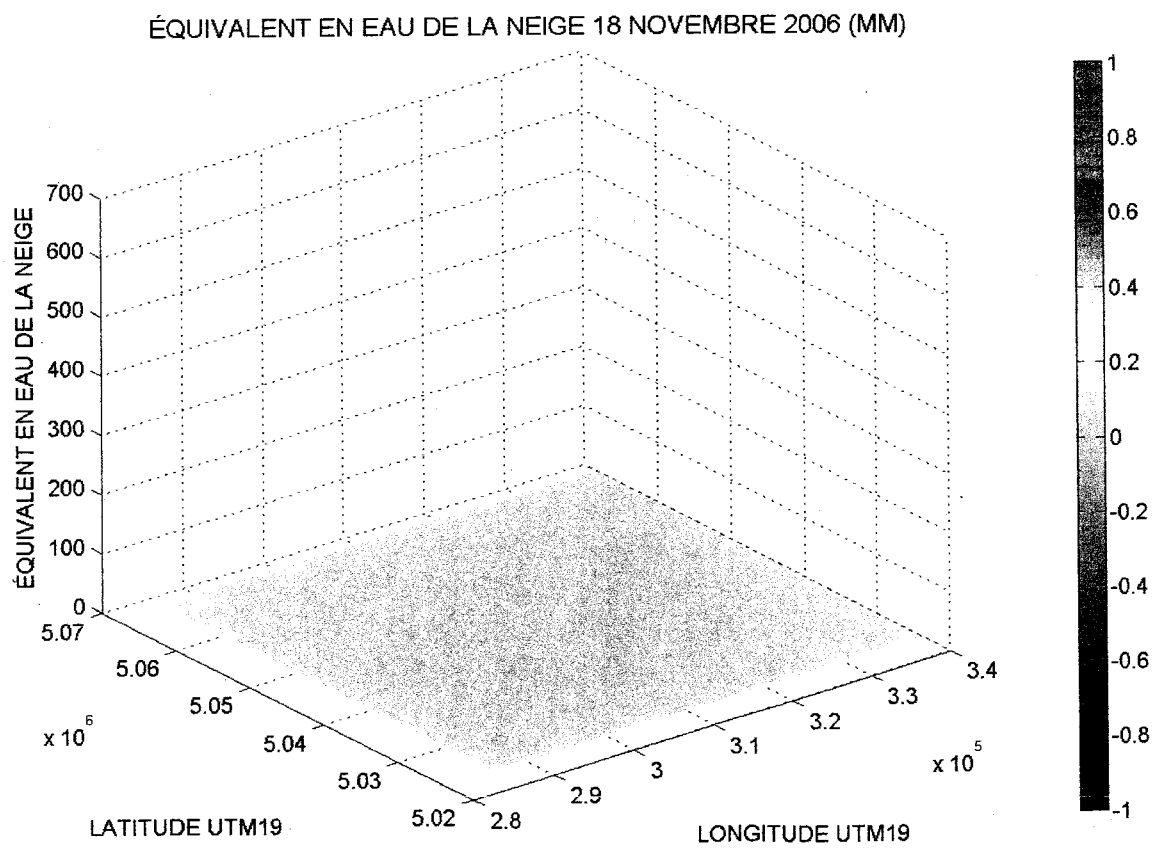
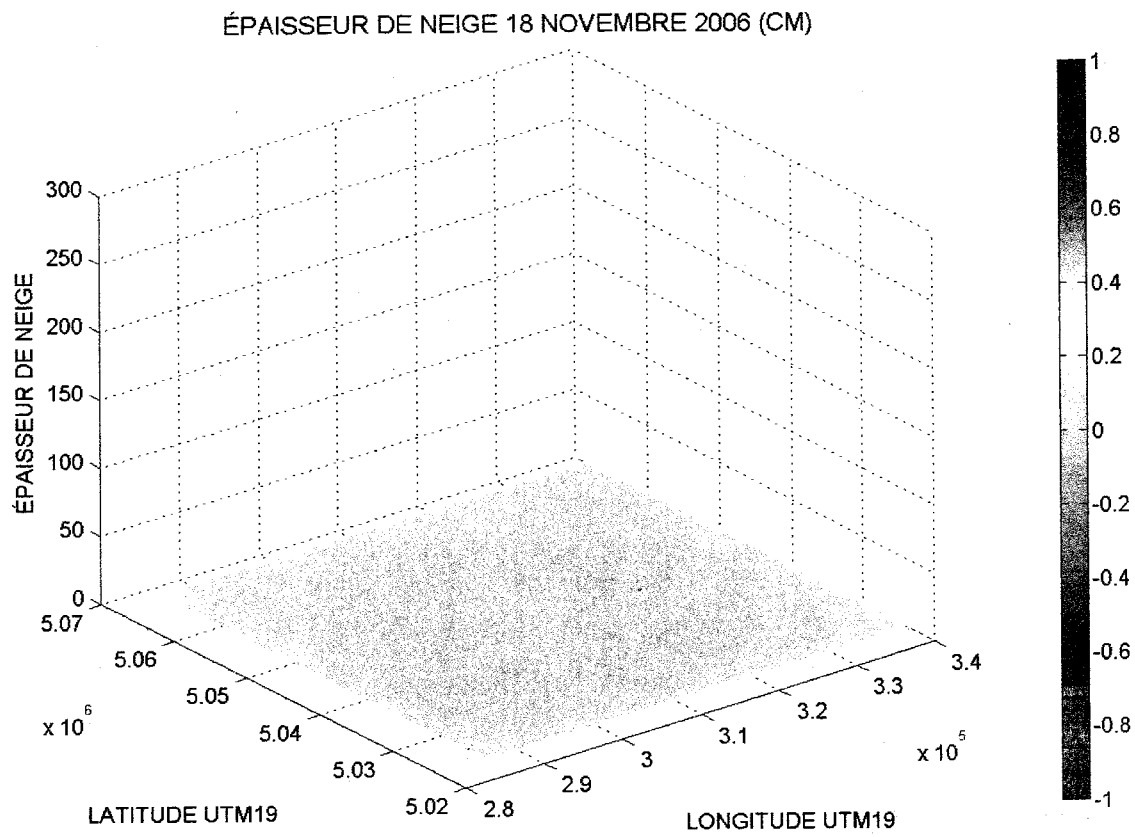


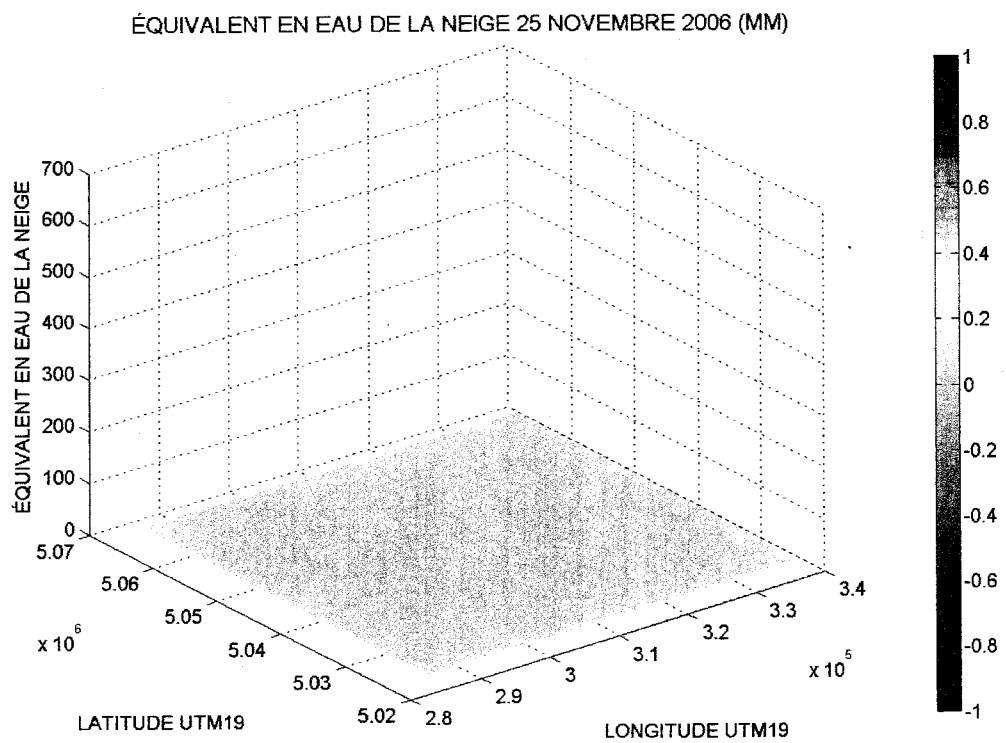
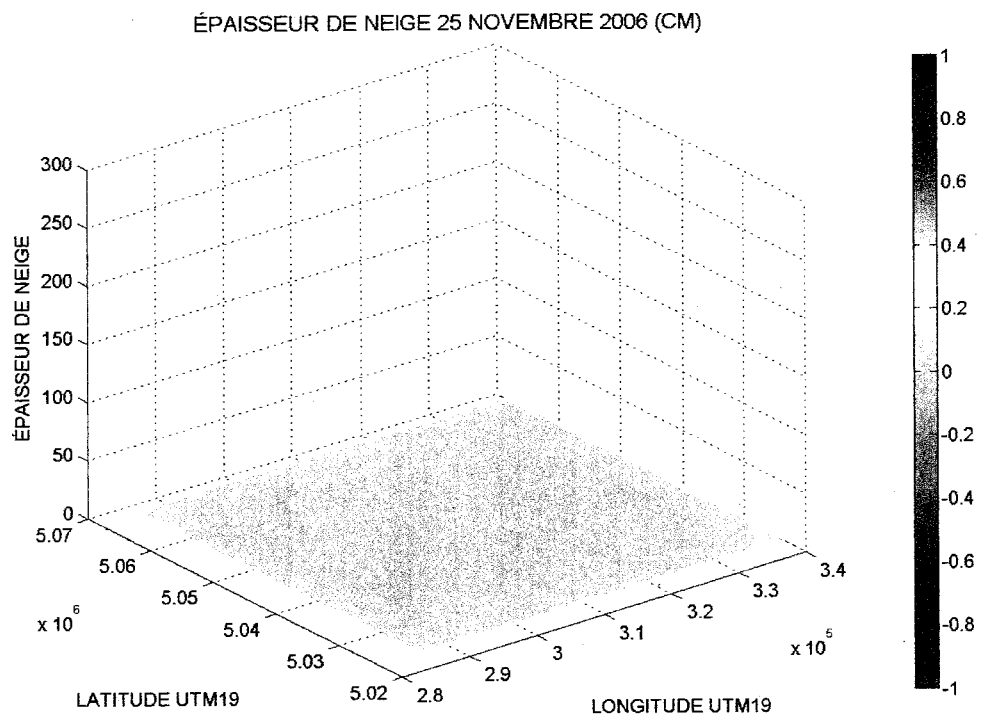
ÉPAISSEUR DE NEIGE 11 NOVEMBRE 2006 (CM)

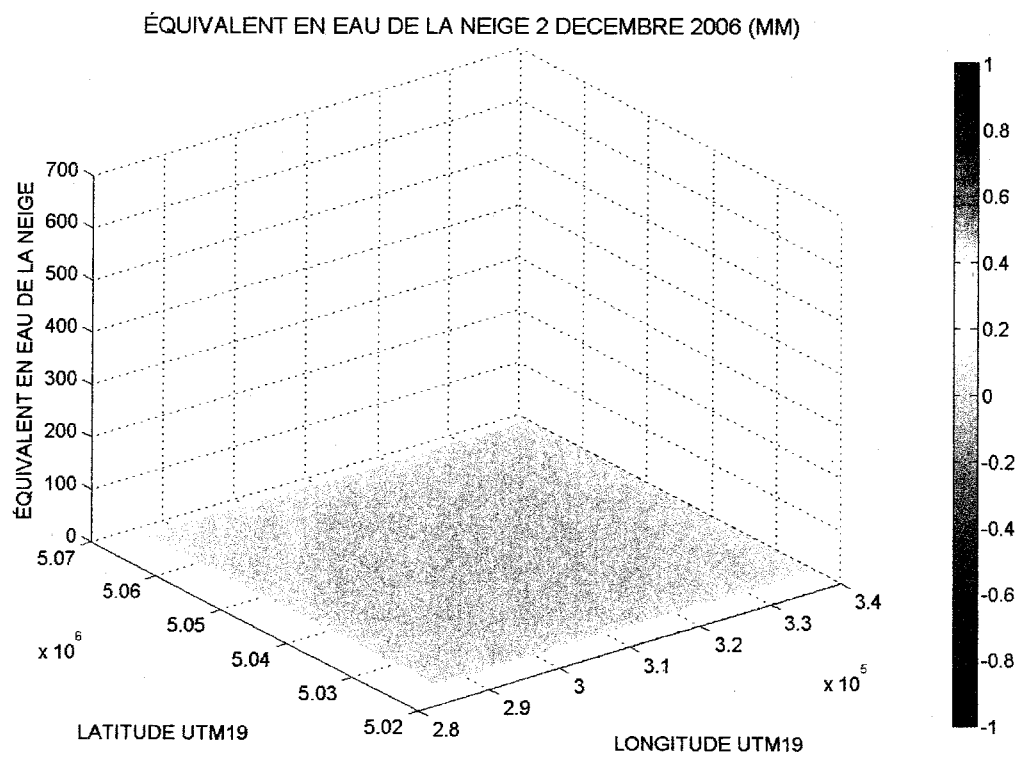
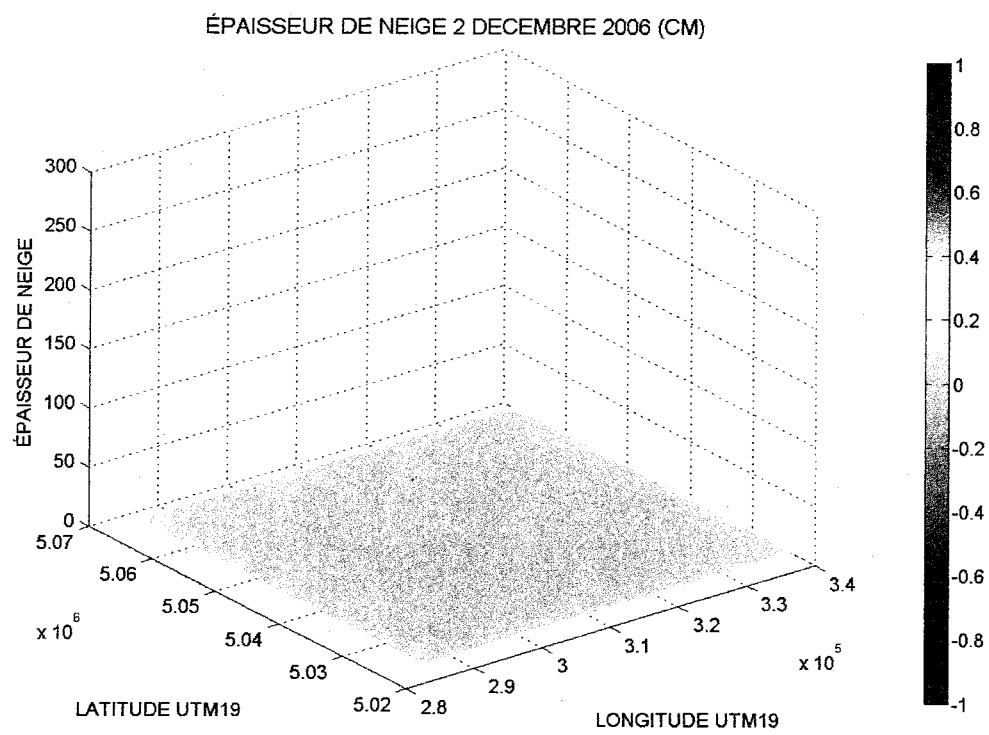


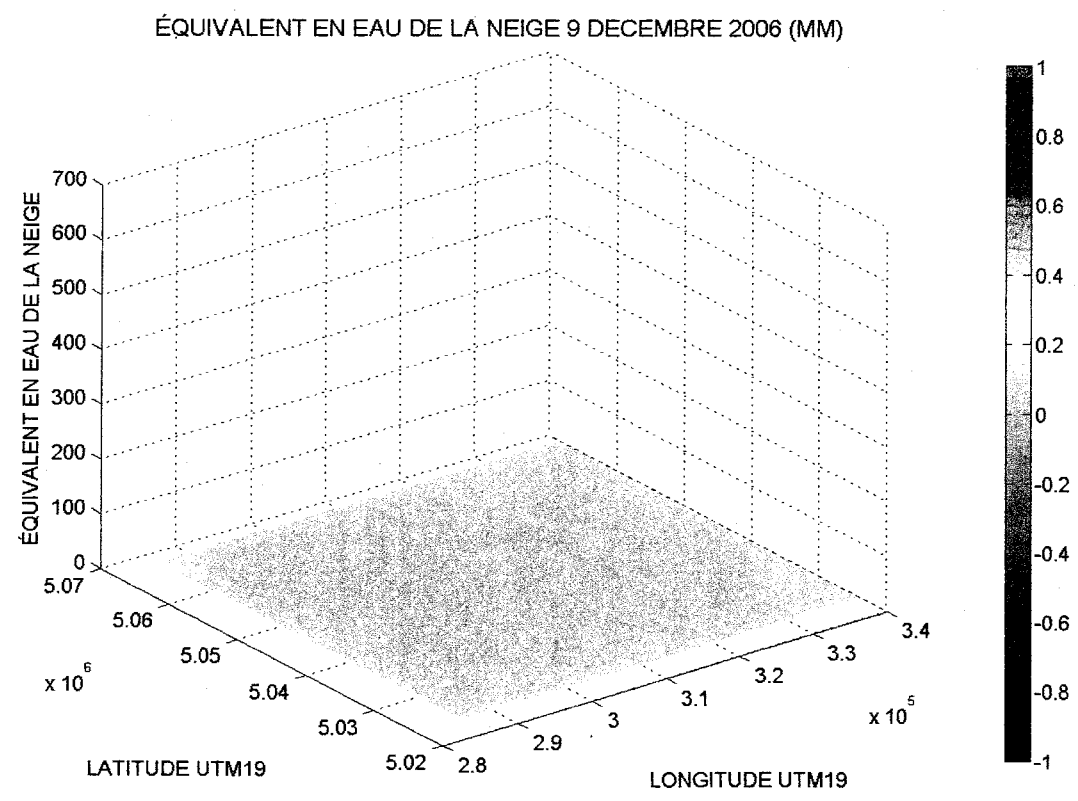
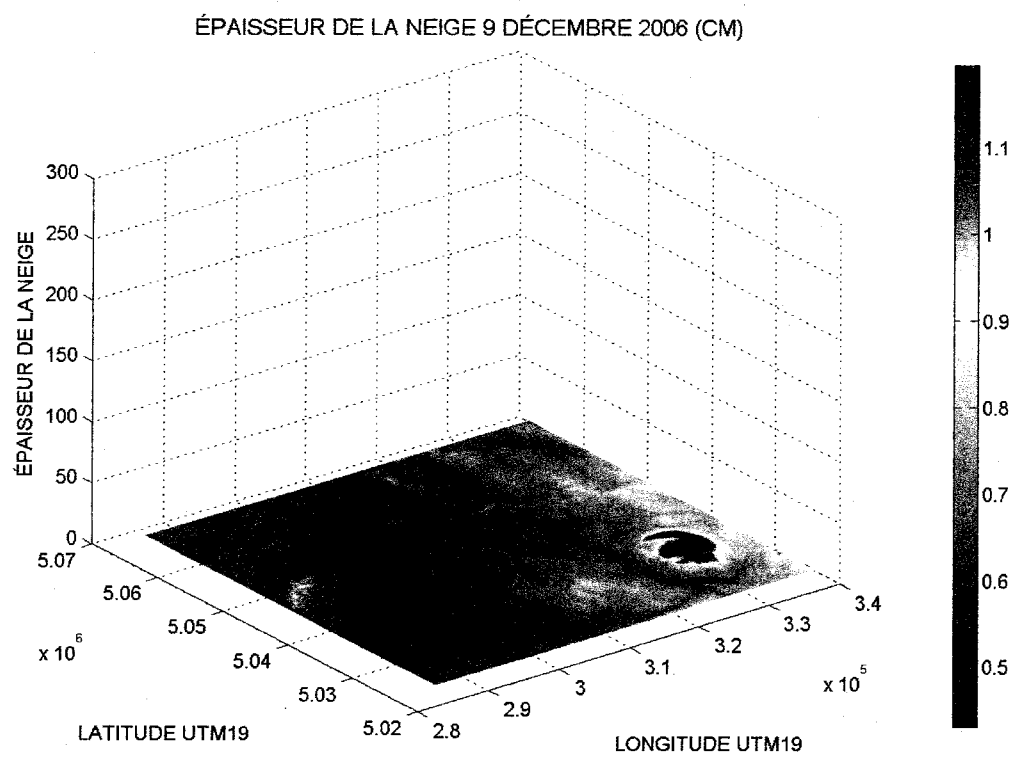
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 11 NOVEMBRE 2006 (MM)



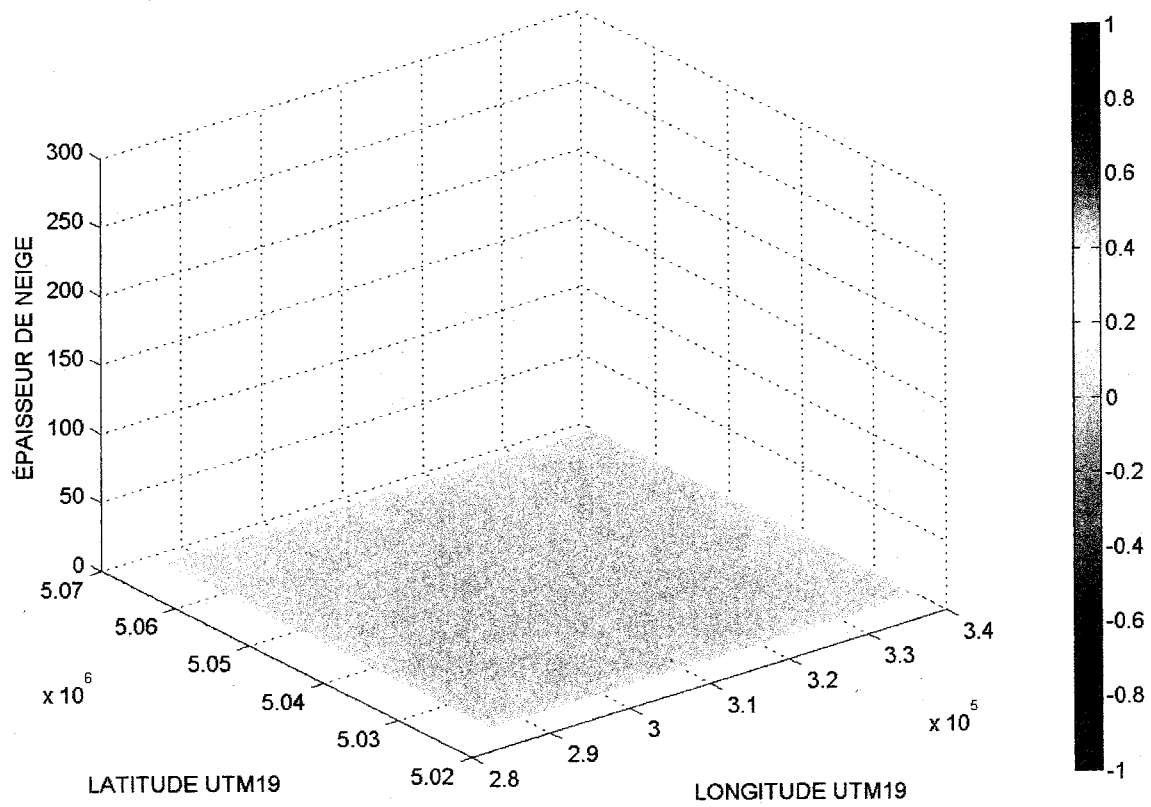




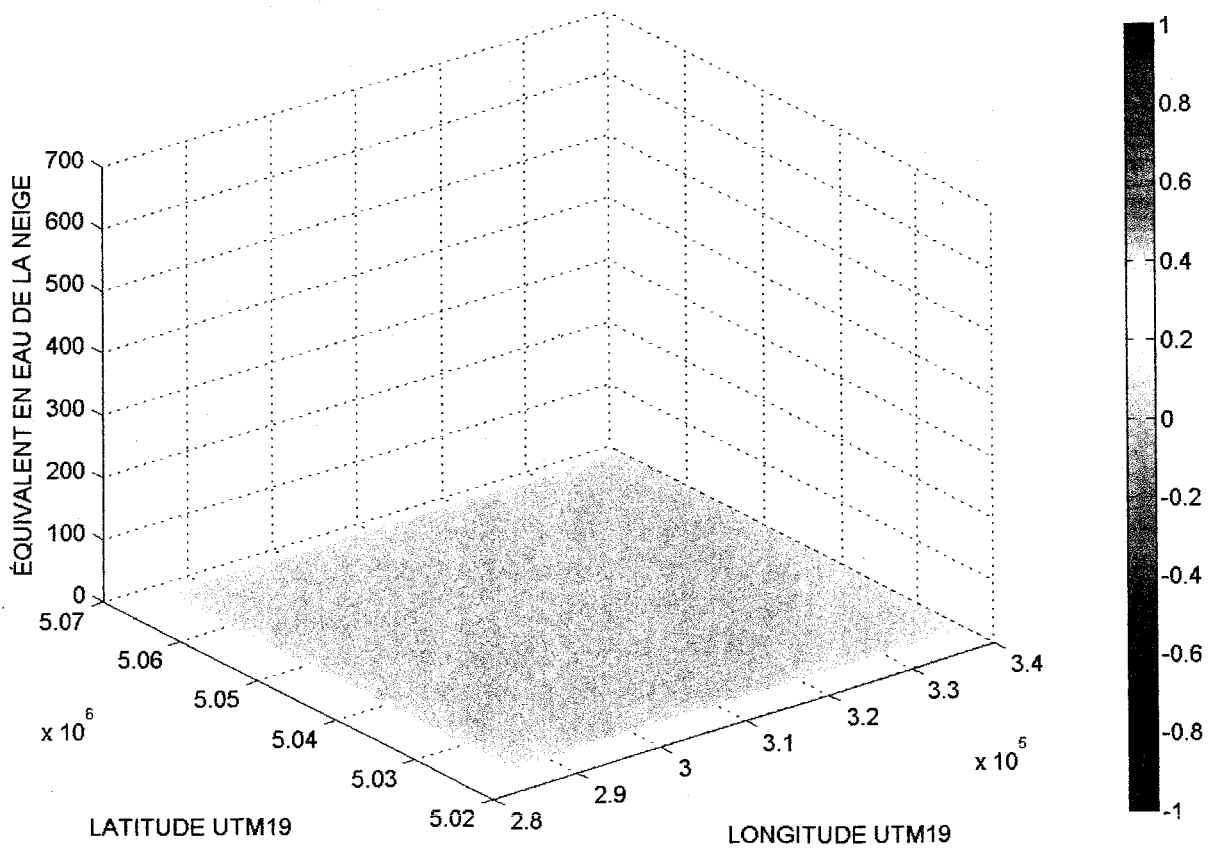




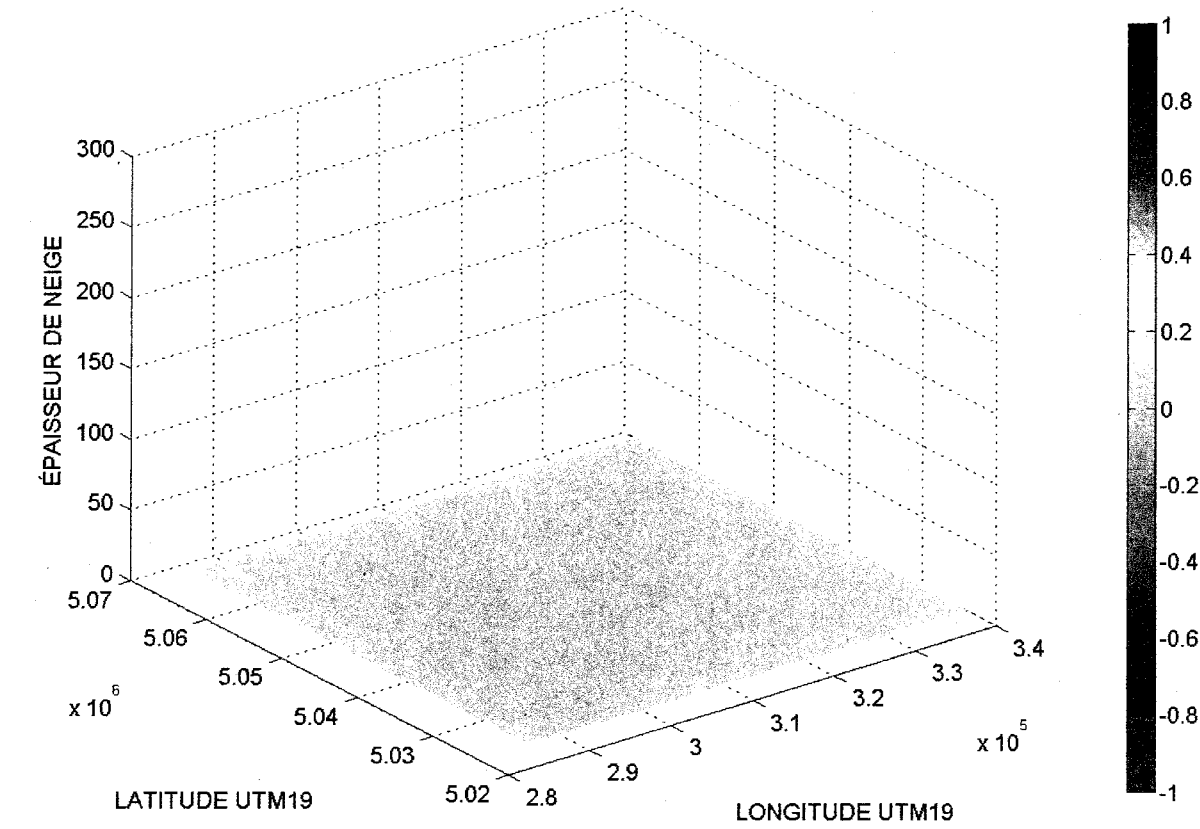
ÉPAISSEUR DE NEIGE 16 DECEMBRE 2006 (CM)



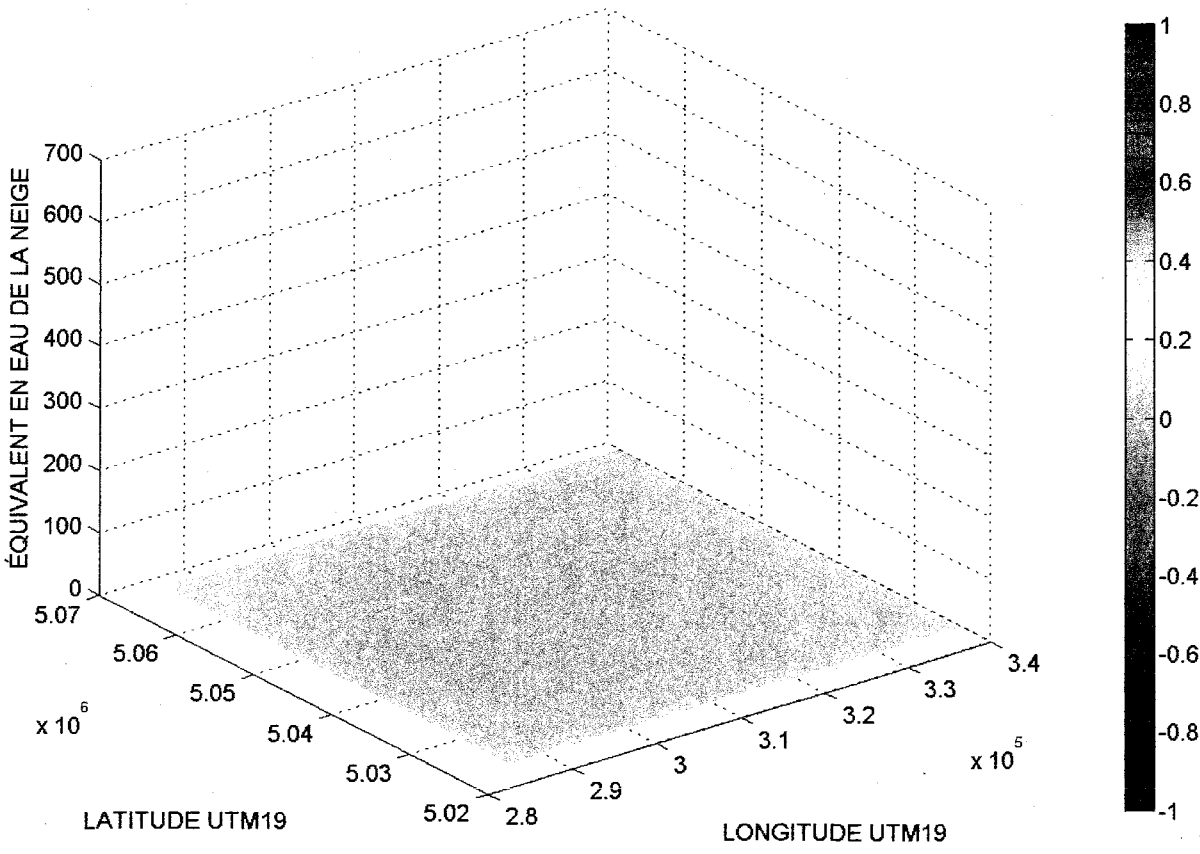
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 16 DECEMBRE 2006 (MM)



ÉPAISSEUR DE NEIGE 23 DECEMBRE 2006 (CM)

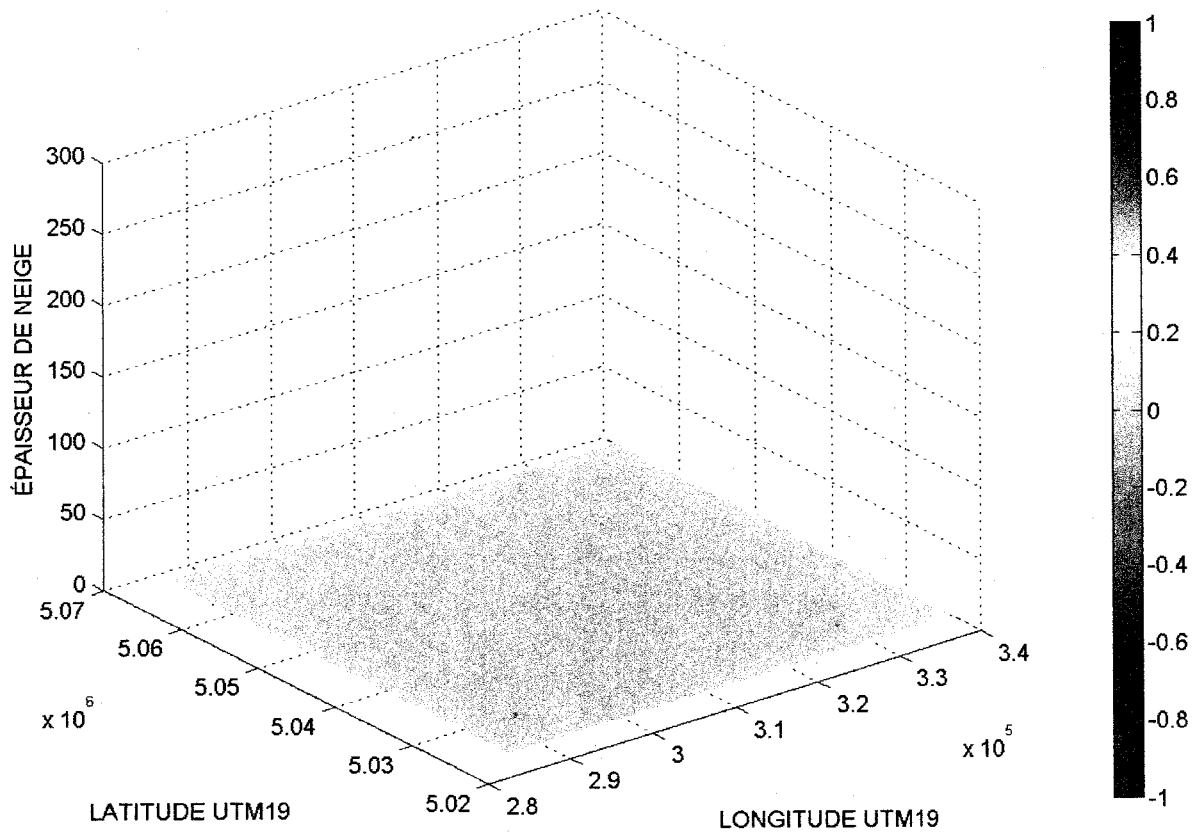


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 23 DECEMBRE 2006 (MM)

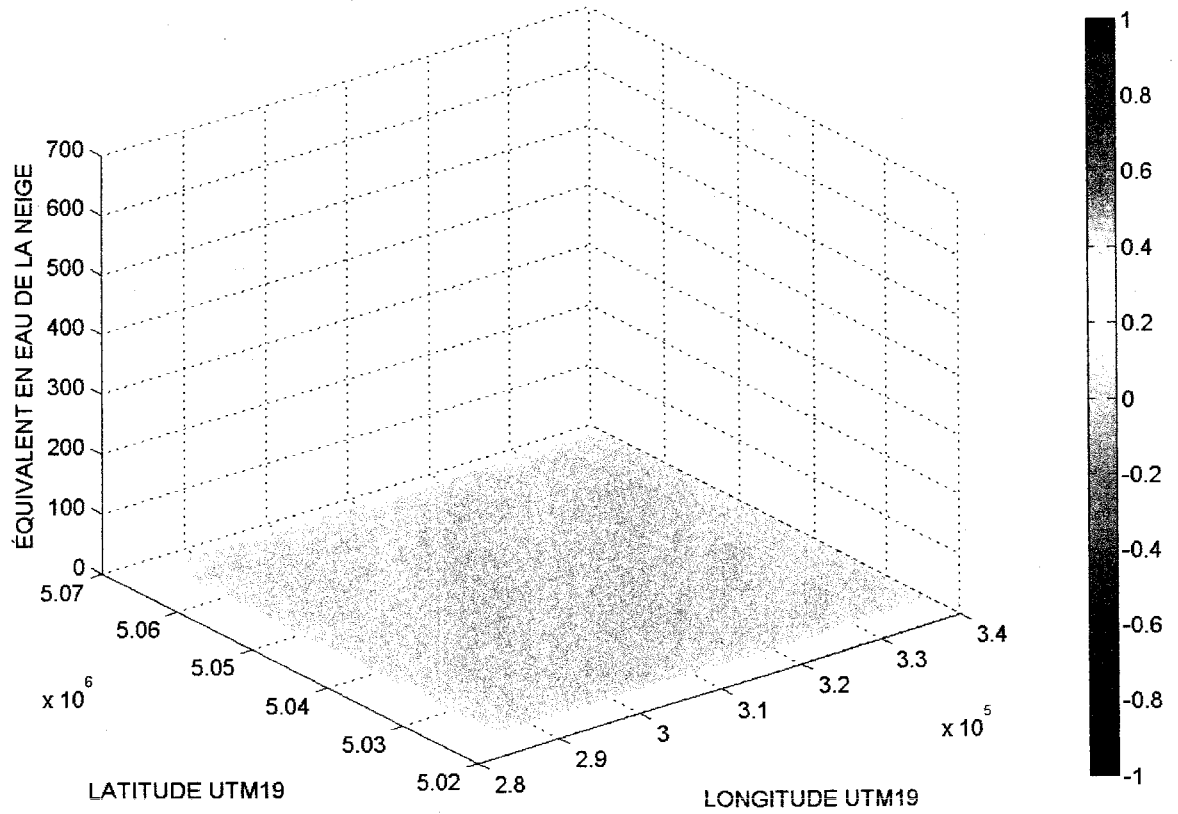




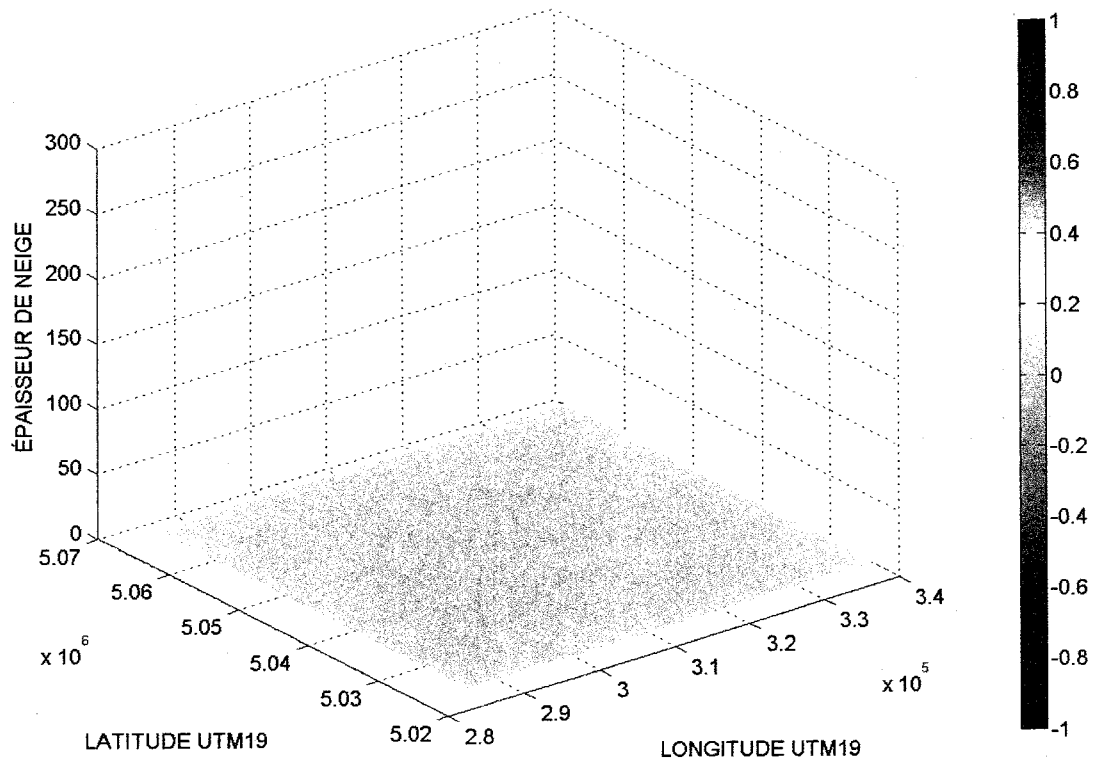
ÉPAISSEUR DE NEIGE 30 DECEMBRE 2006 (CM)



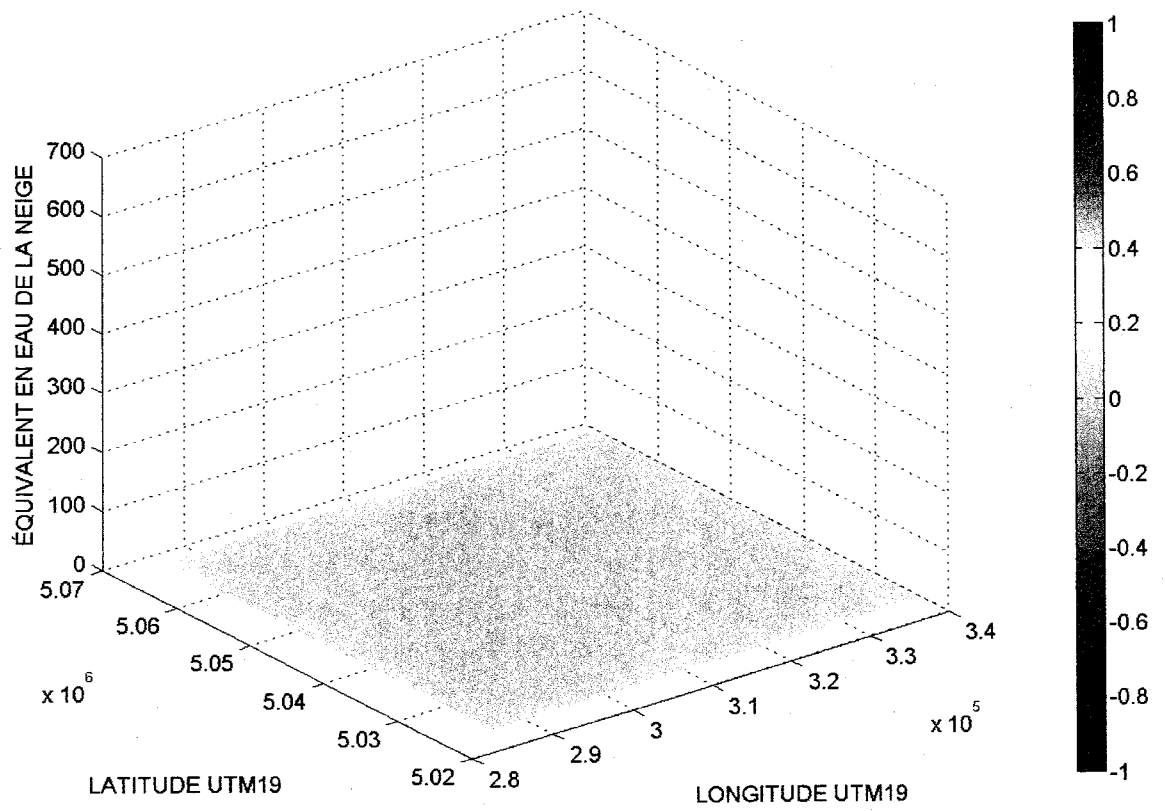
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 30 DECEMBRE 2006 (MM)



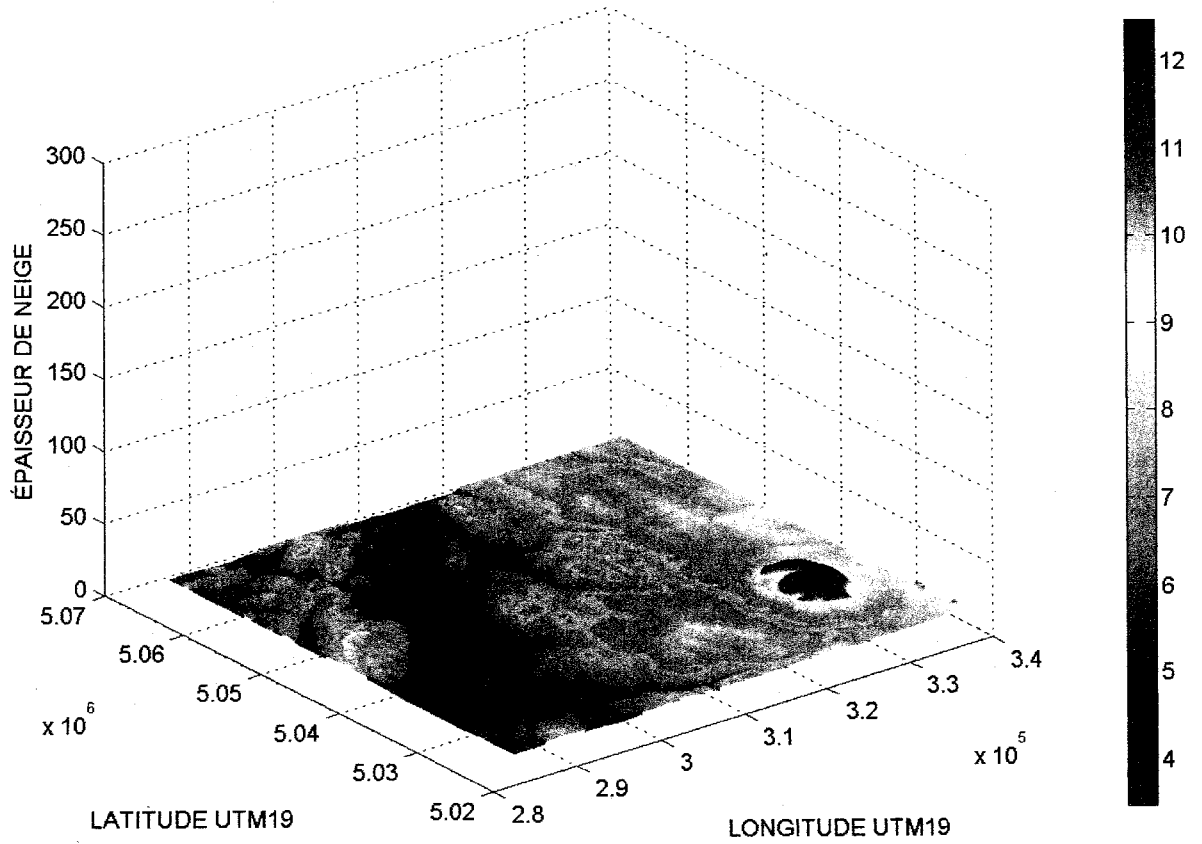
ÉPAISSEUR DE NEIGE 6 JANVIER 2007 (CM)



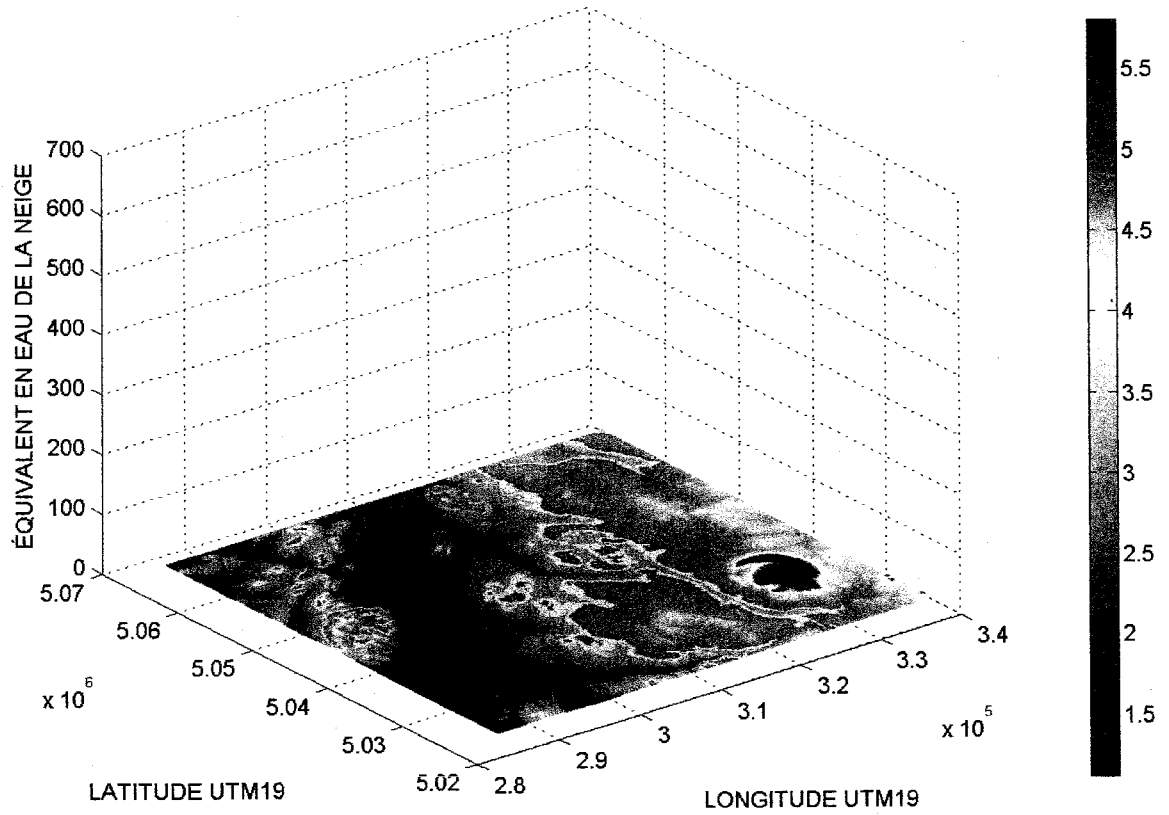
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 6 JANVIER 2007 (MM)



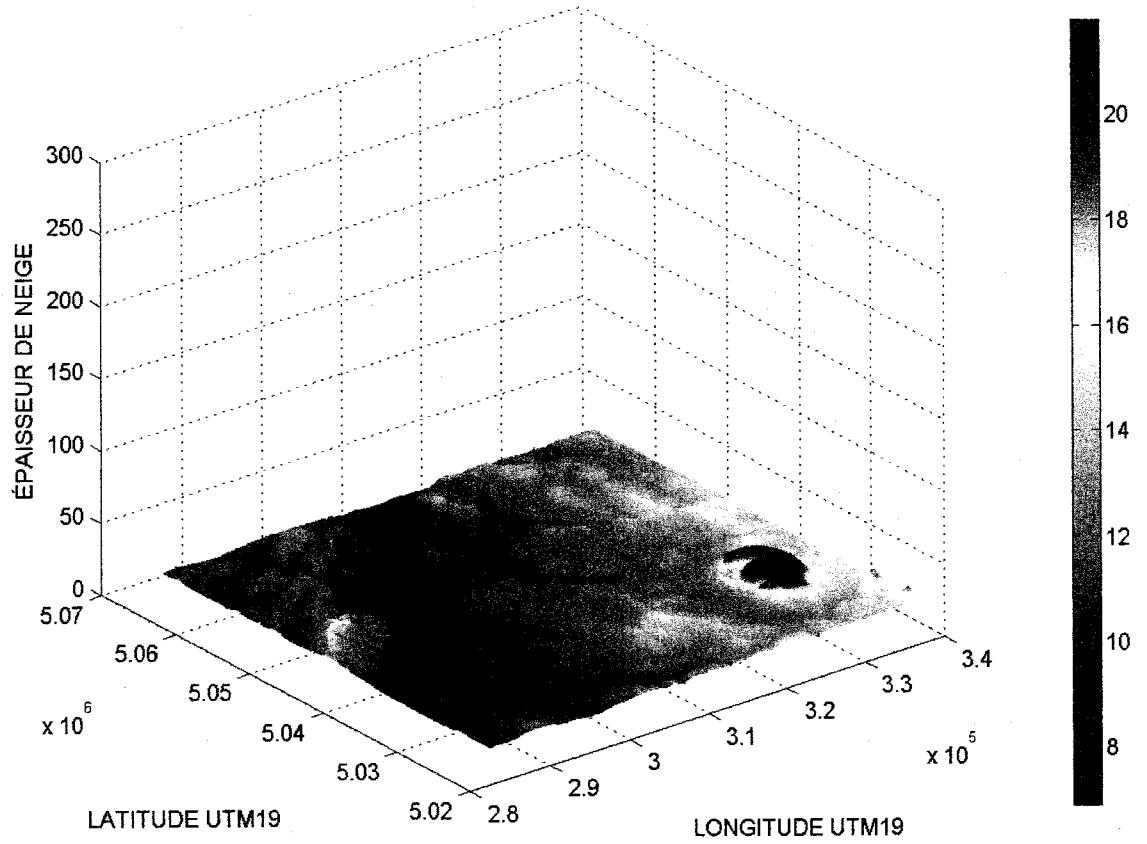
ÉPAISSEUR DE NEIGE 13 JANVIER 2007 (CM)



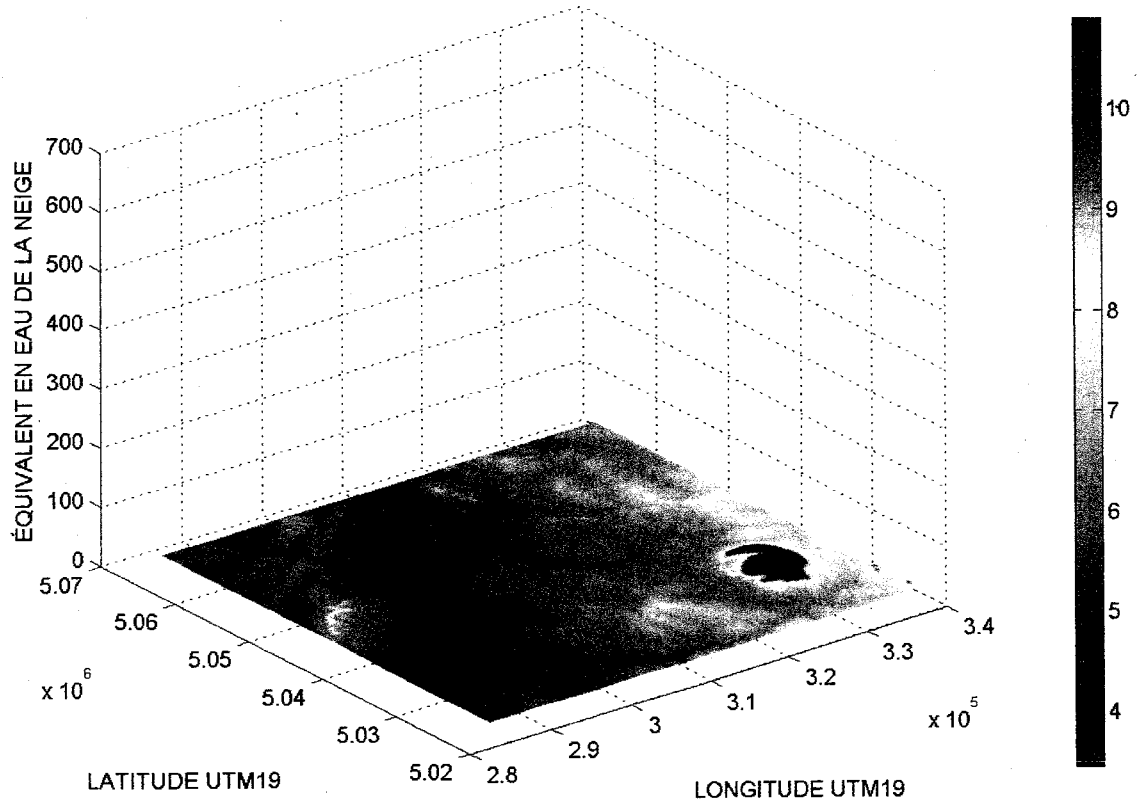
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 13 JANVIER 2007 (MM)



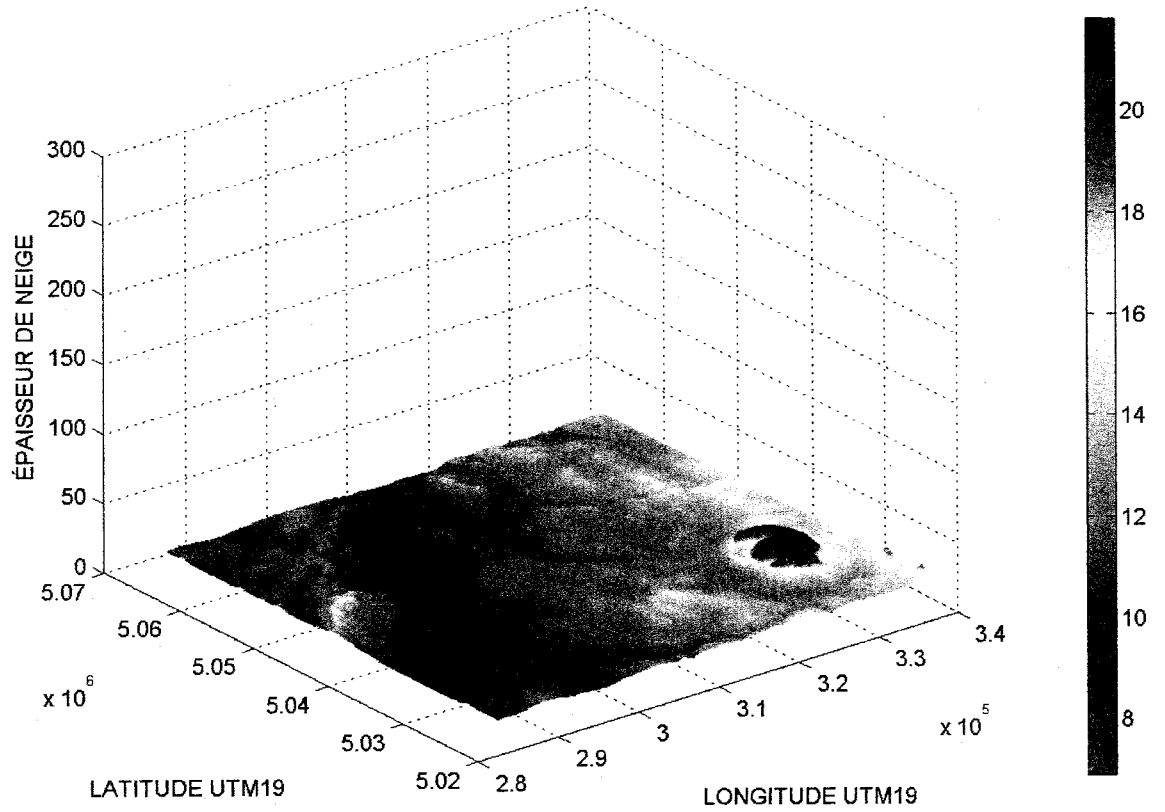
ÉPAISSEUR DE NEIGE 20 JANVIER 2007 (CM)



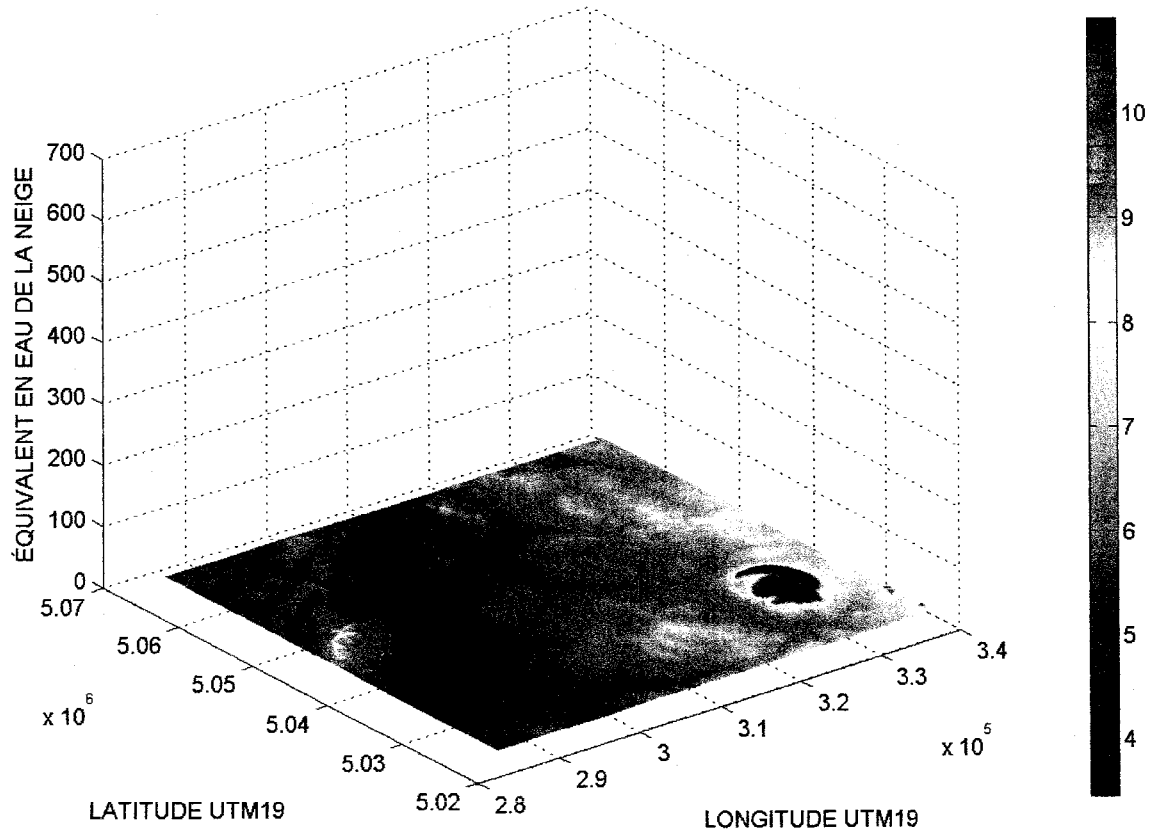
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 20 JANVIER 2007 (MM)



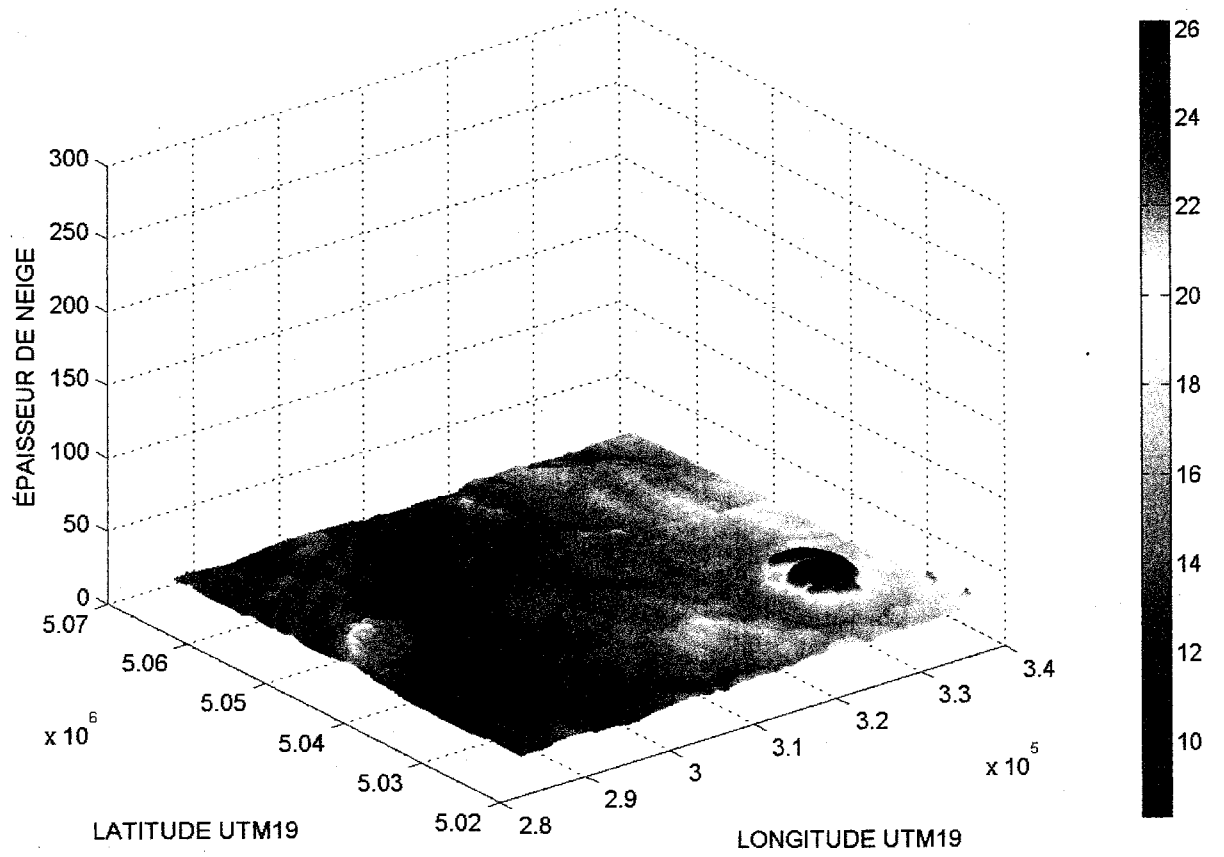
ÉPAISSEUR DE NEIGE 27 JANVIER 2007 (CM)



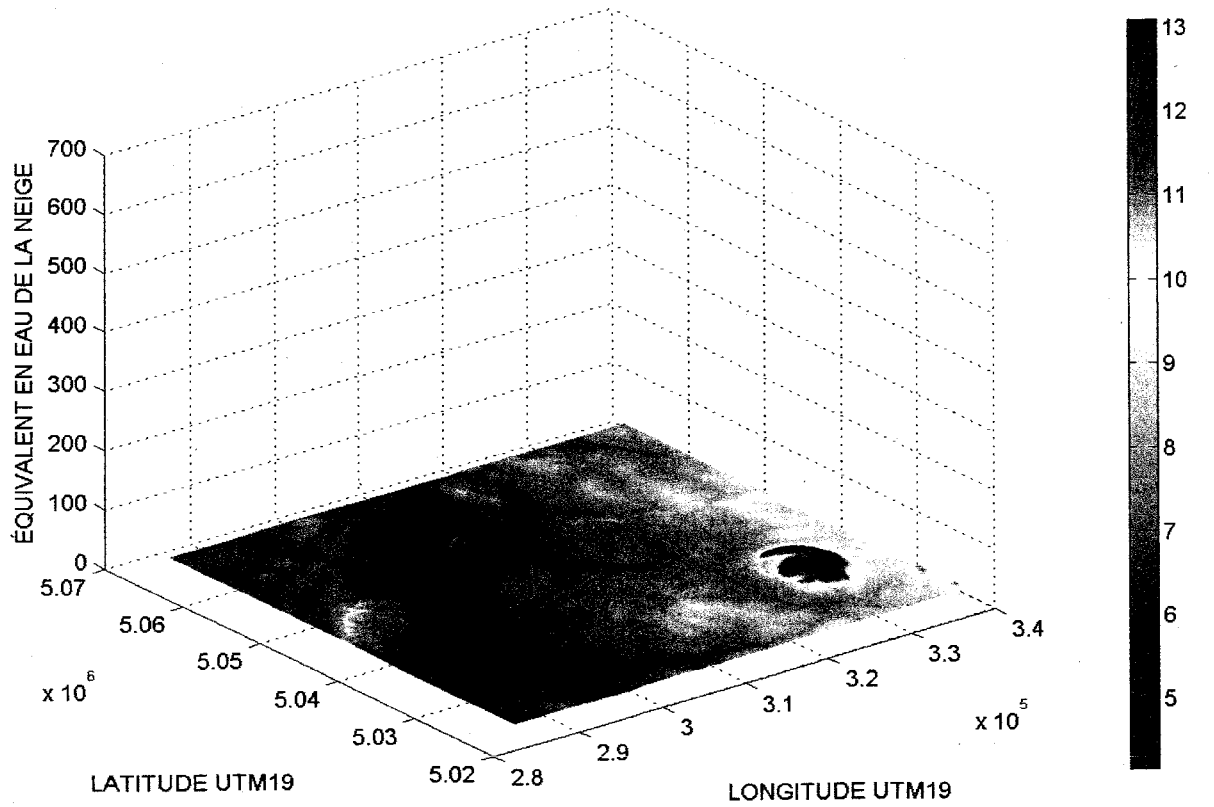
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 27 JANVIER 2007 (MM)



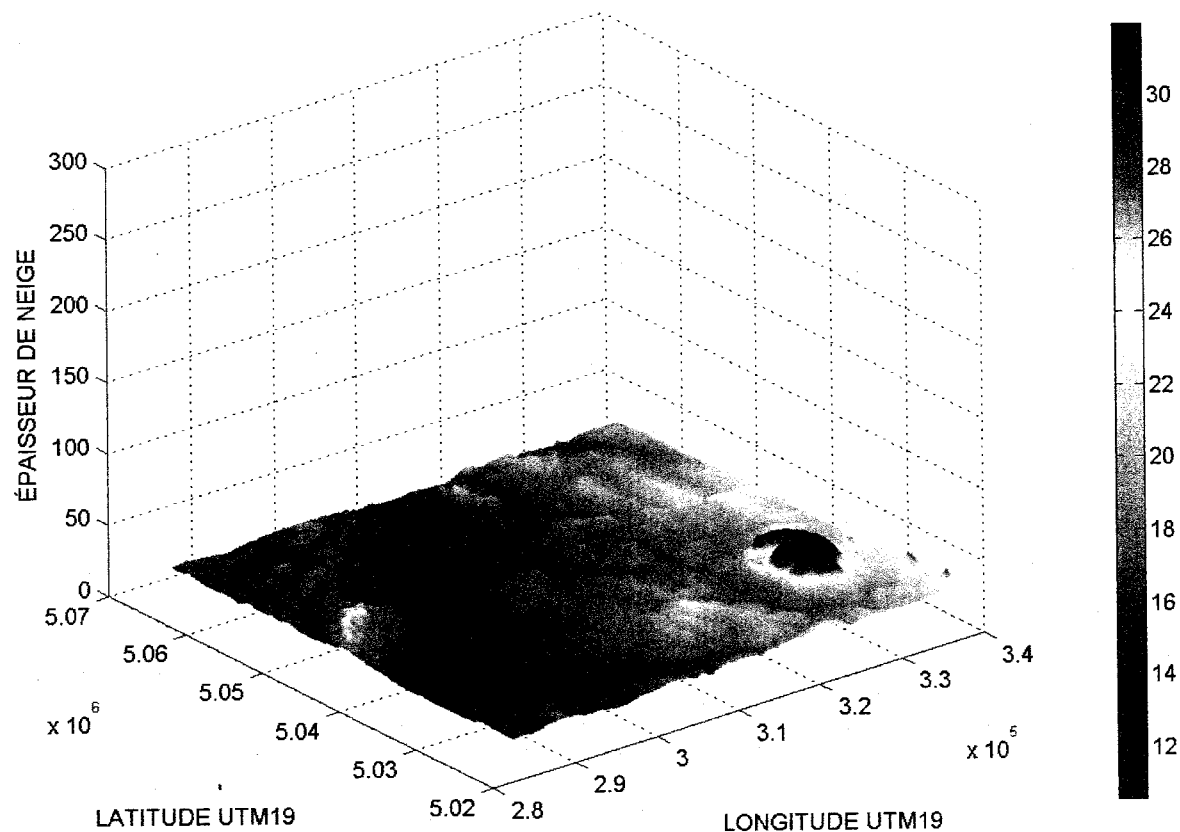
ÉPAISSEUR DE NEIGE 3 FEVRIER 2007 (CM)



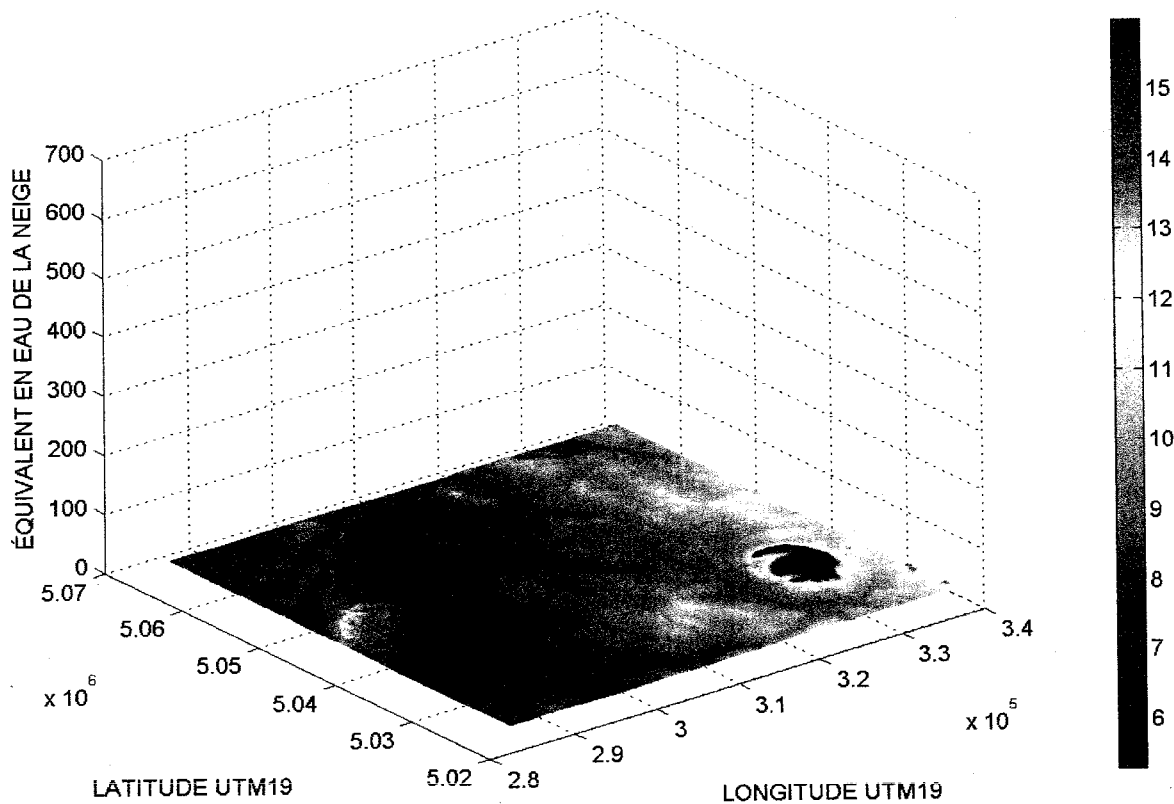
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 3 FEVRIER 2007 (MM)



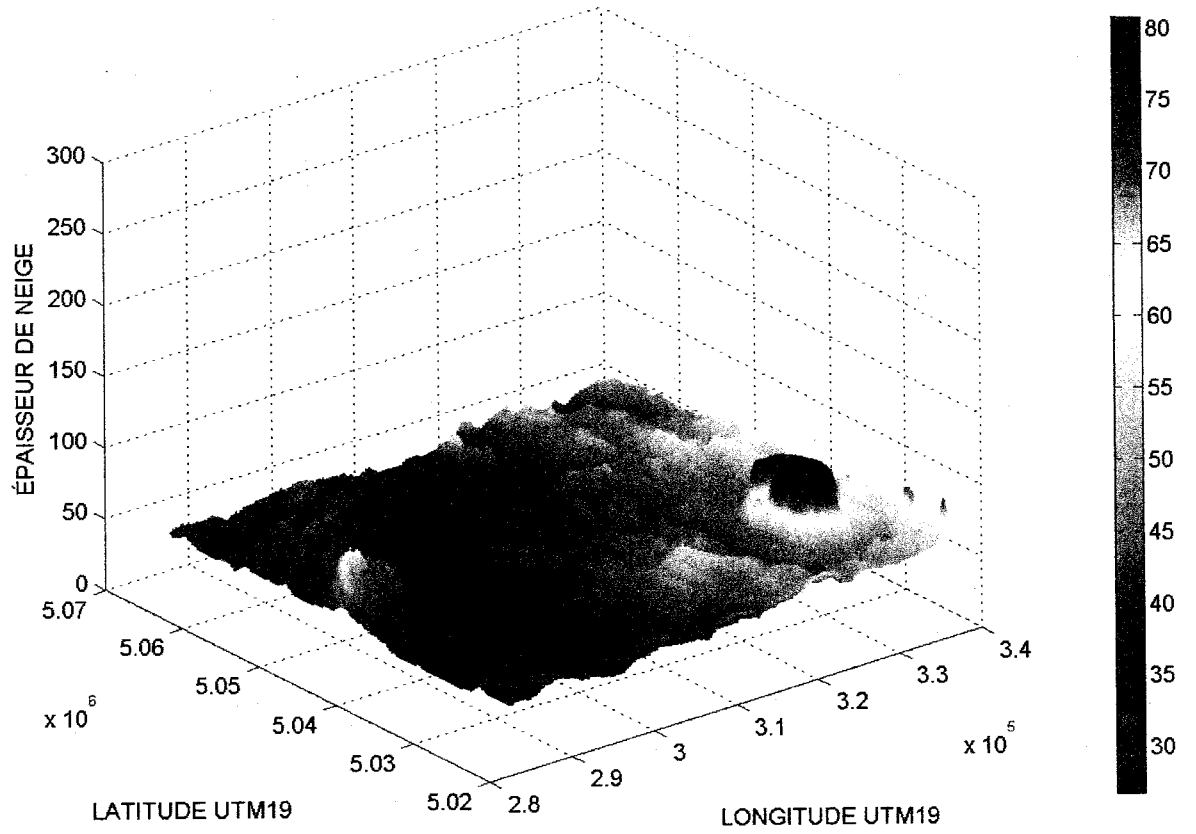
ÉPAISSEUR DE NEIGE 10 FEVRIER 2007 (CM)



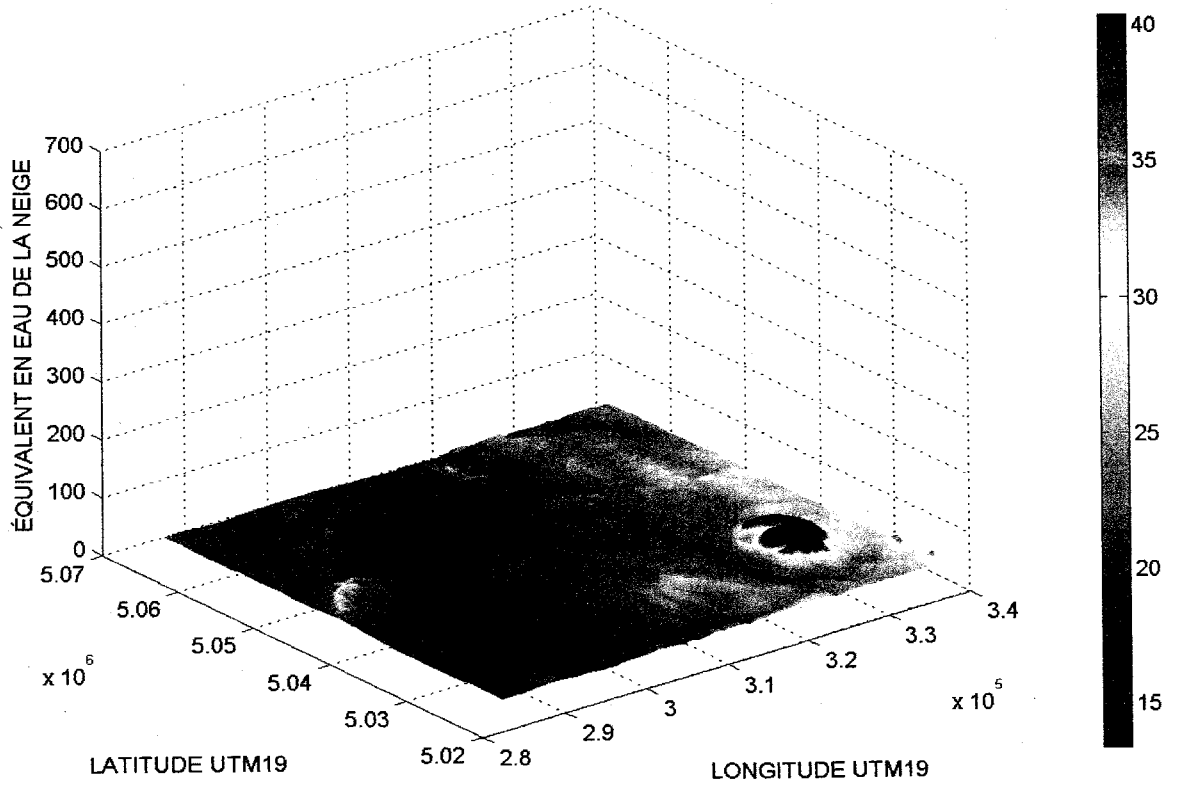
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 10 FEVRIER 2007 (MM)



ÉPAISSEUR DE NEIGE 17 FEVRIER 2007 (CM)

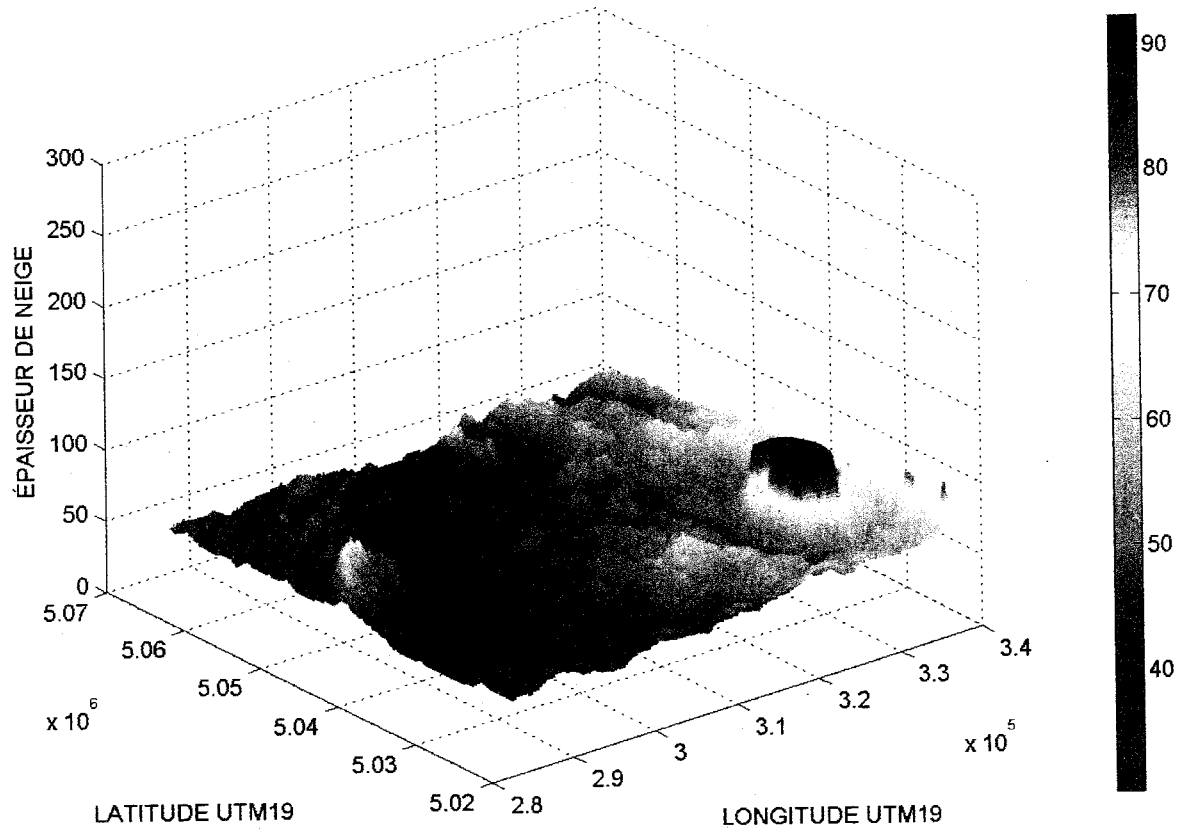


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 17 FEVRIER 2007 (MM)

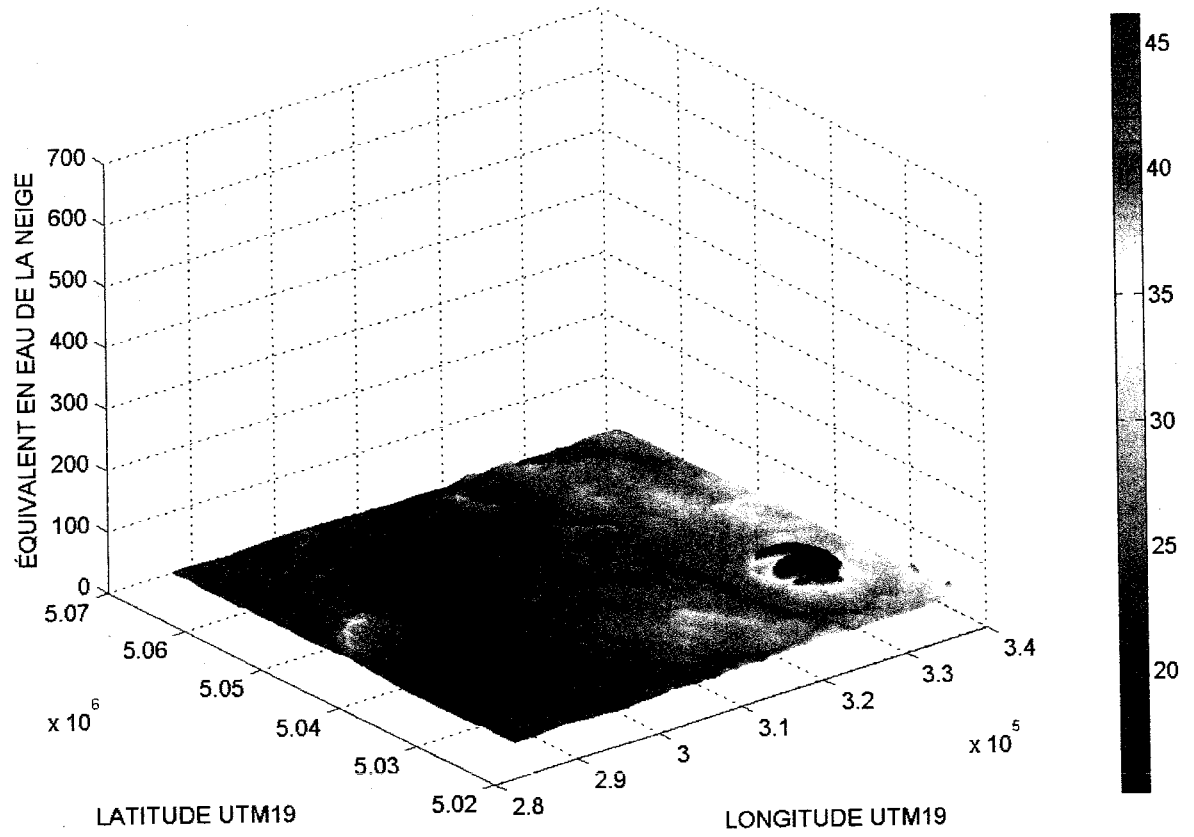




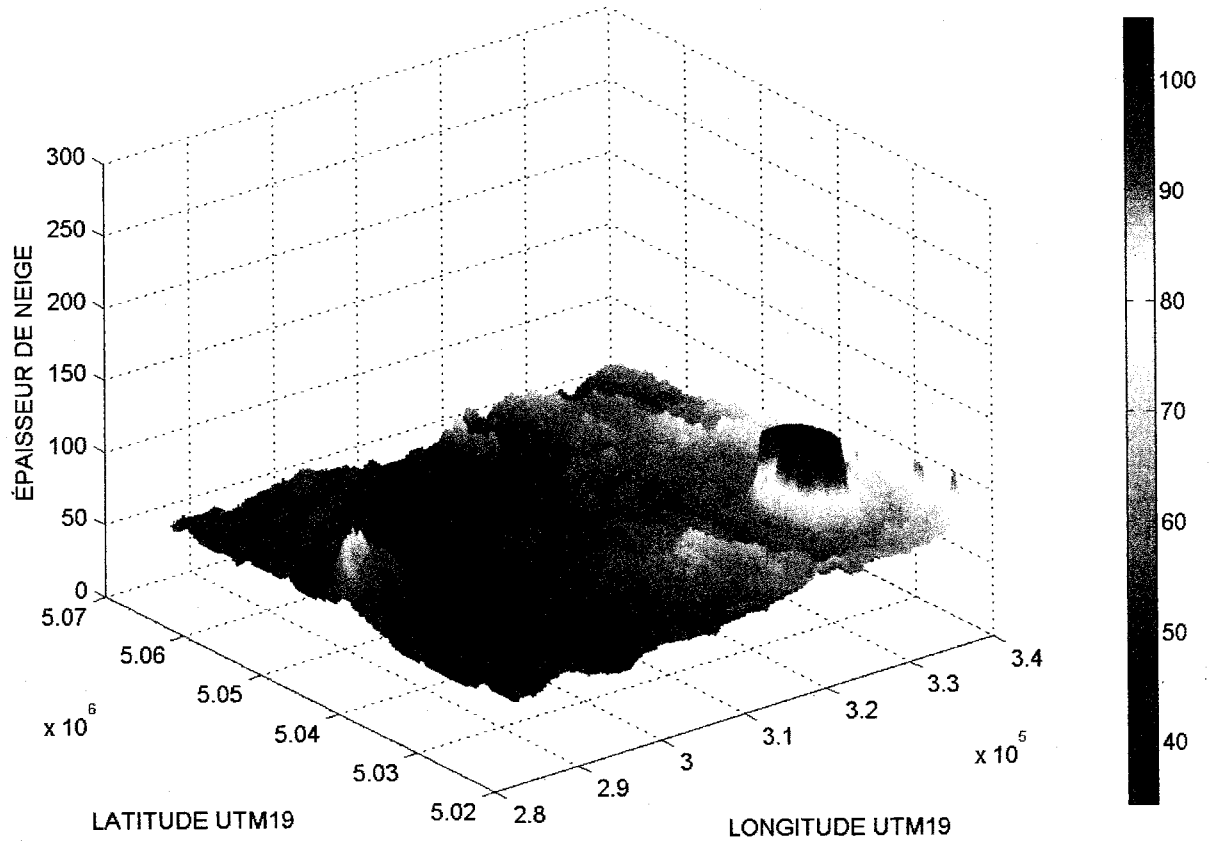
ÉPAISSEUR DE NEIGE 24 FEVRIER 2007 (CM)



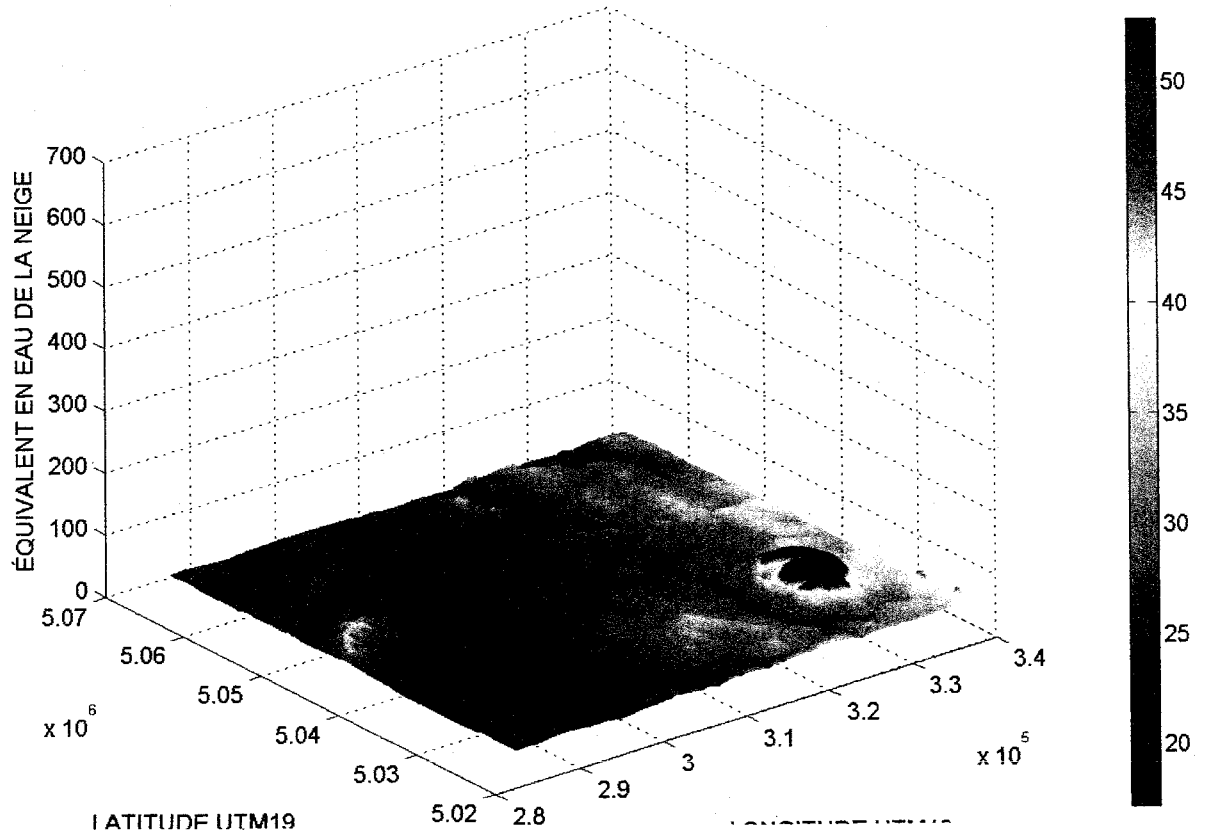
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 24 FEVRIER 2007 (MM)



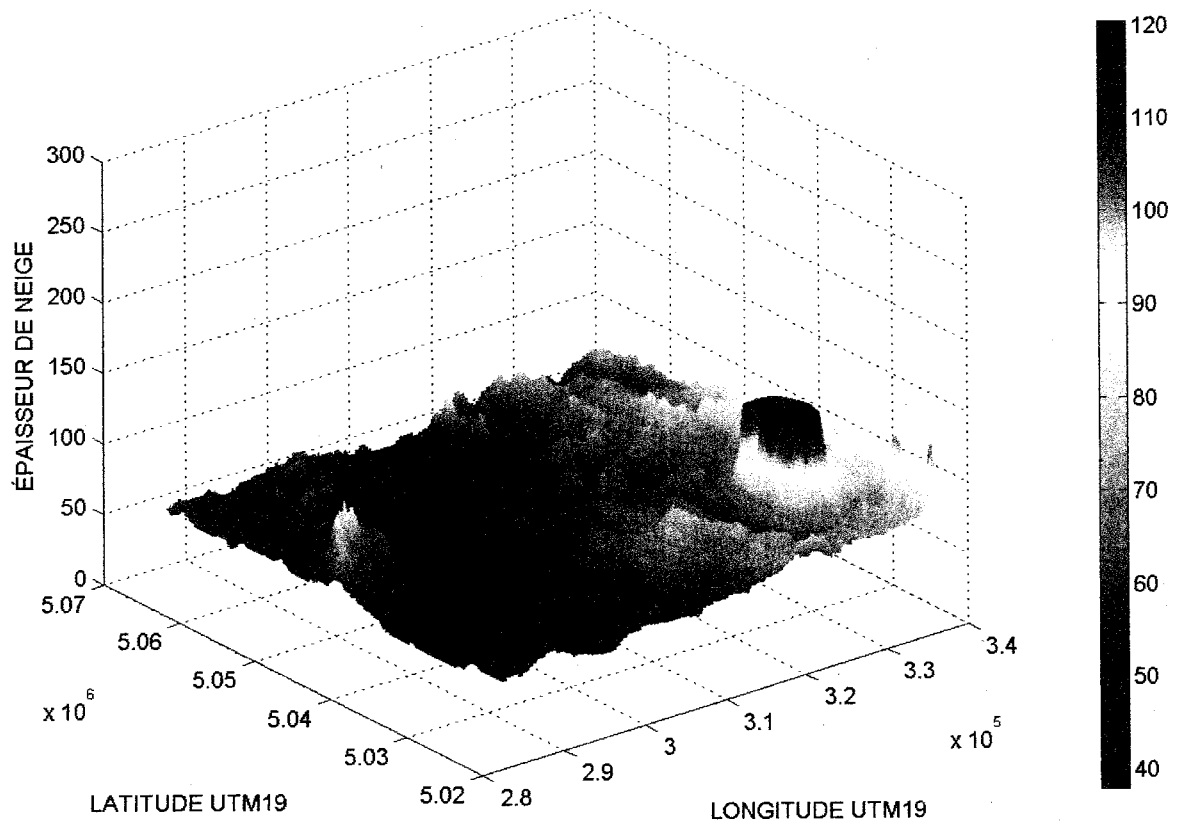
ÉPAISSEUR DE NEIGE 3 MARS 2007 (CM)



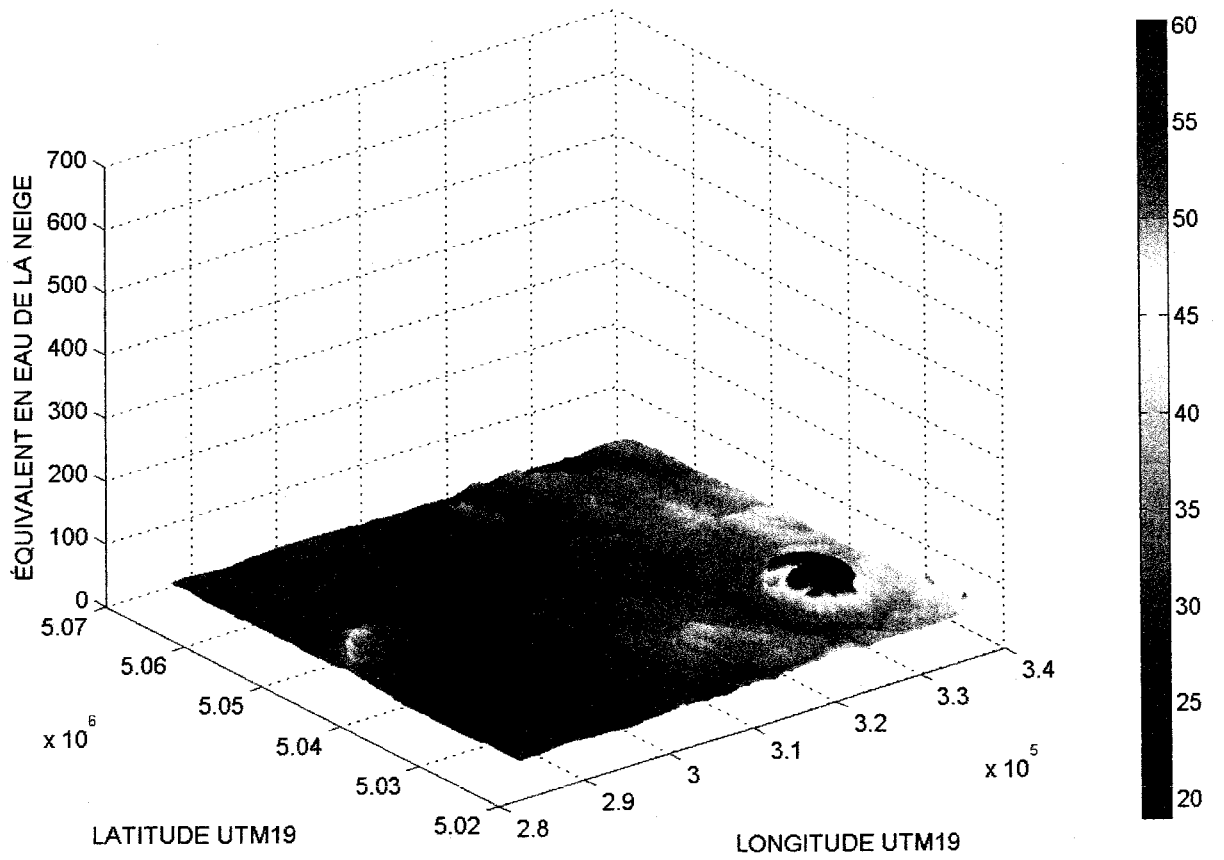
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 3 MARS 2007 (MM)



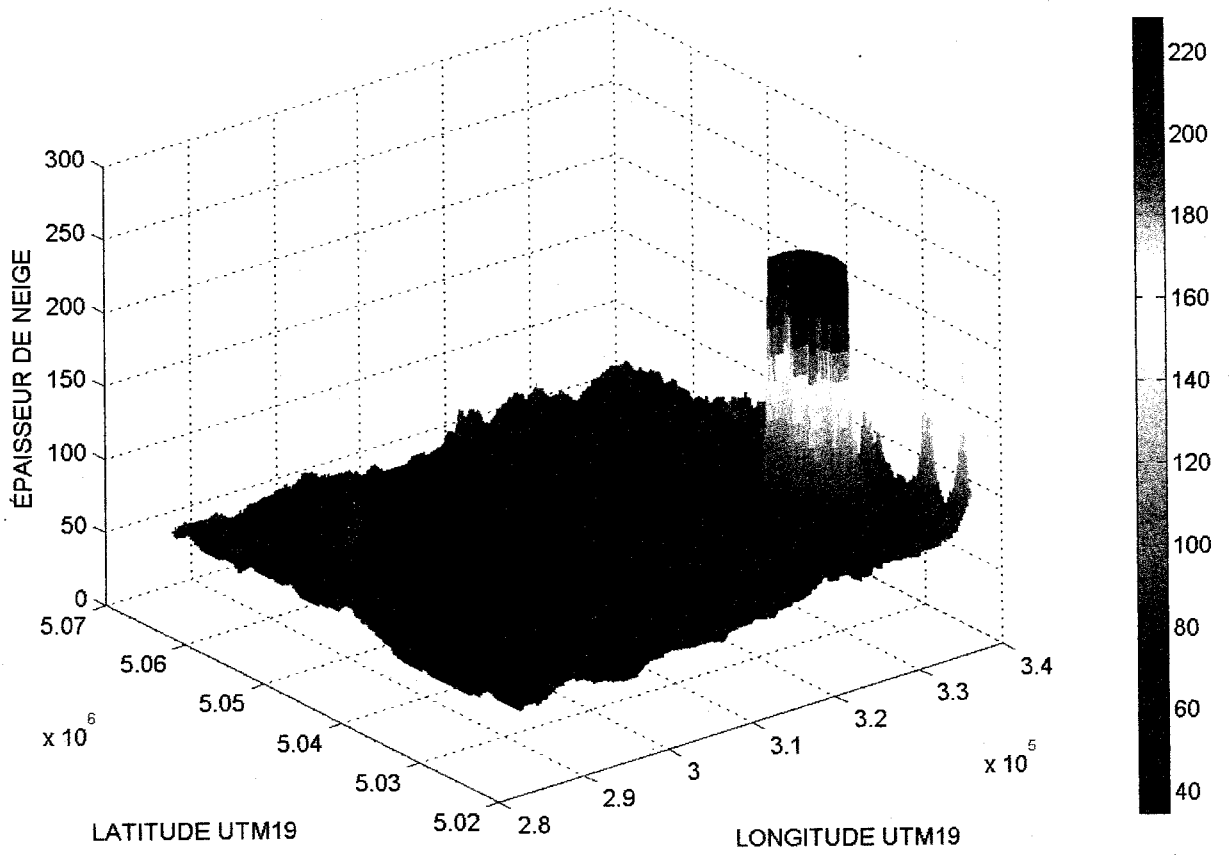
ÉPAISSEUR DE NEIGE 10 MARS 2007 (CM)



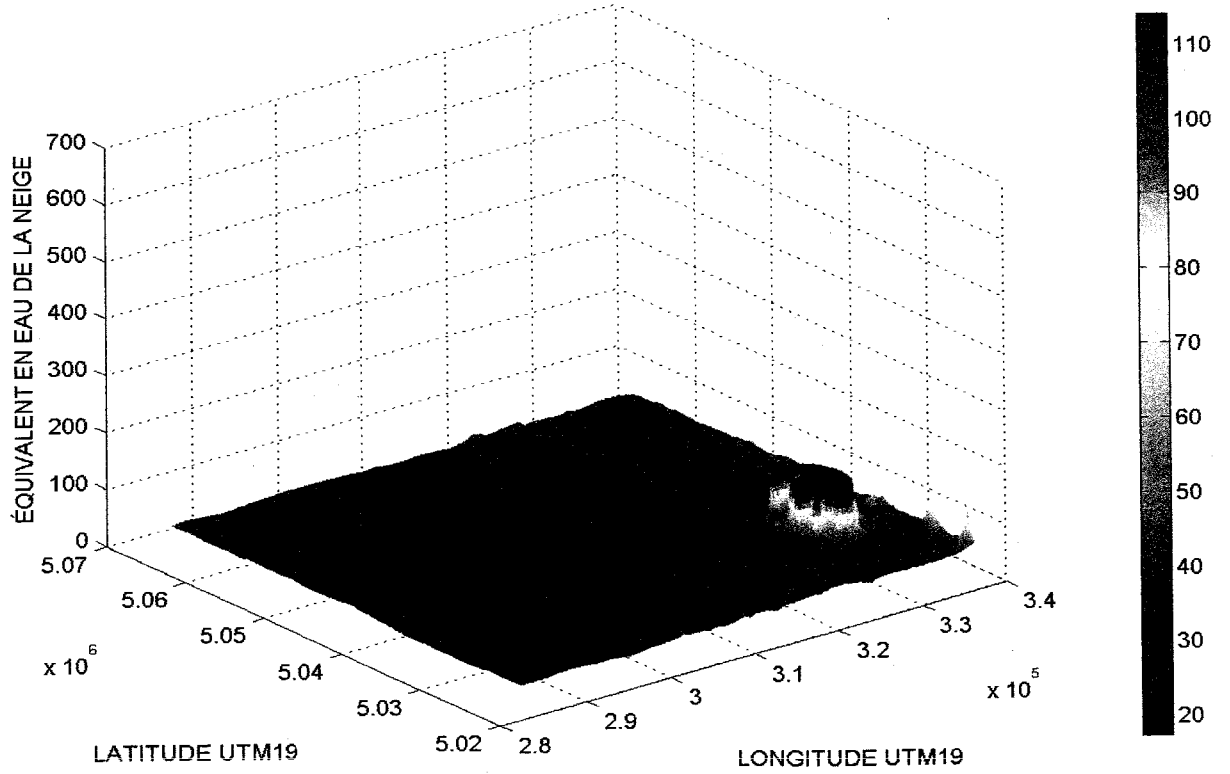
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 10 MARS 2007 (MM)



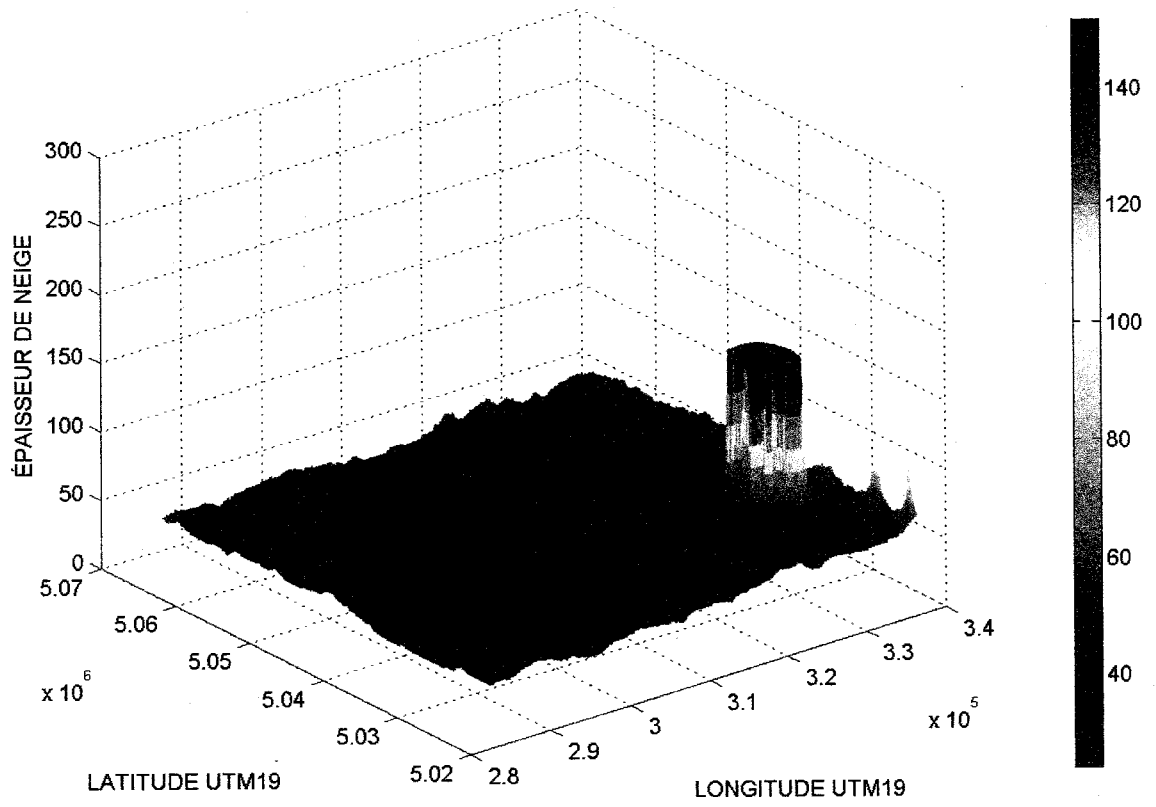
ÉPAISSEUR DE NEIGE 17 MARS 2007 (CM)



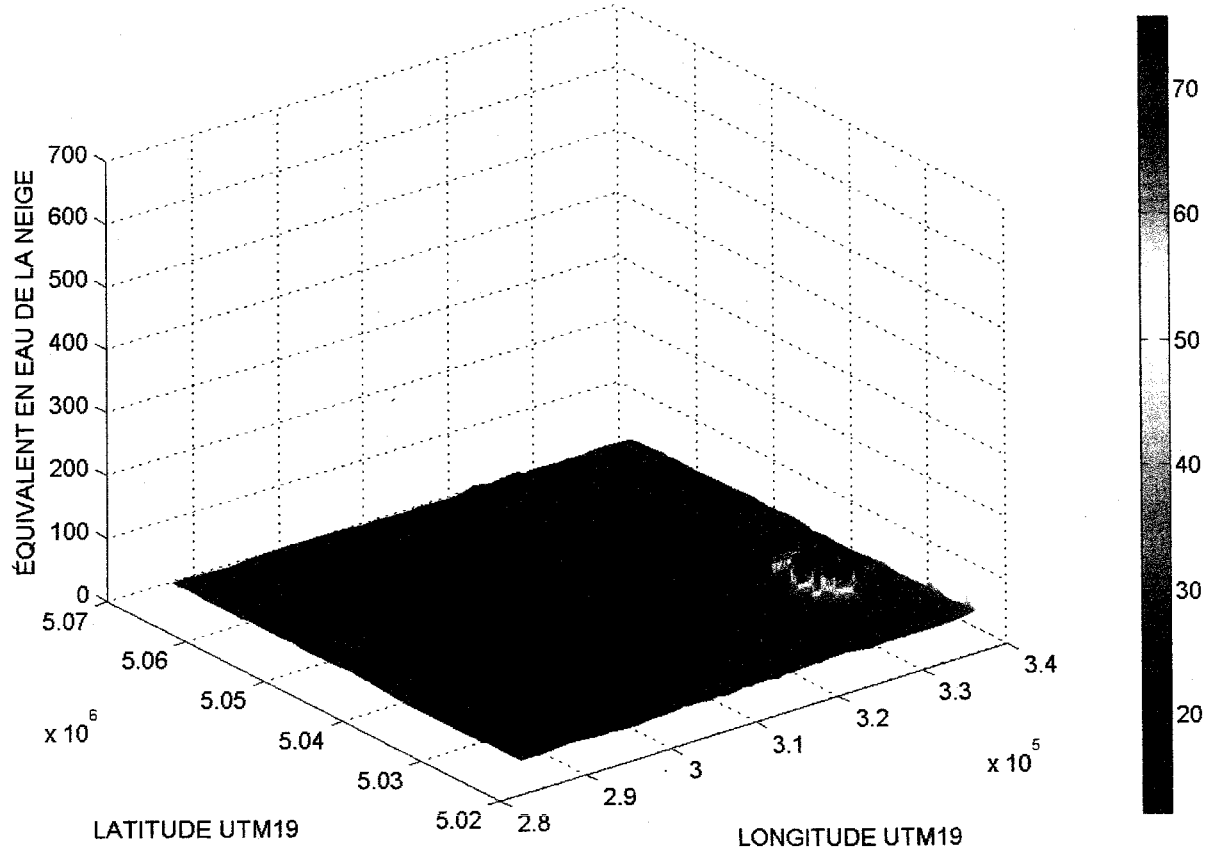
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 17 MARS 2007 (MM)



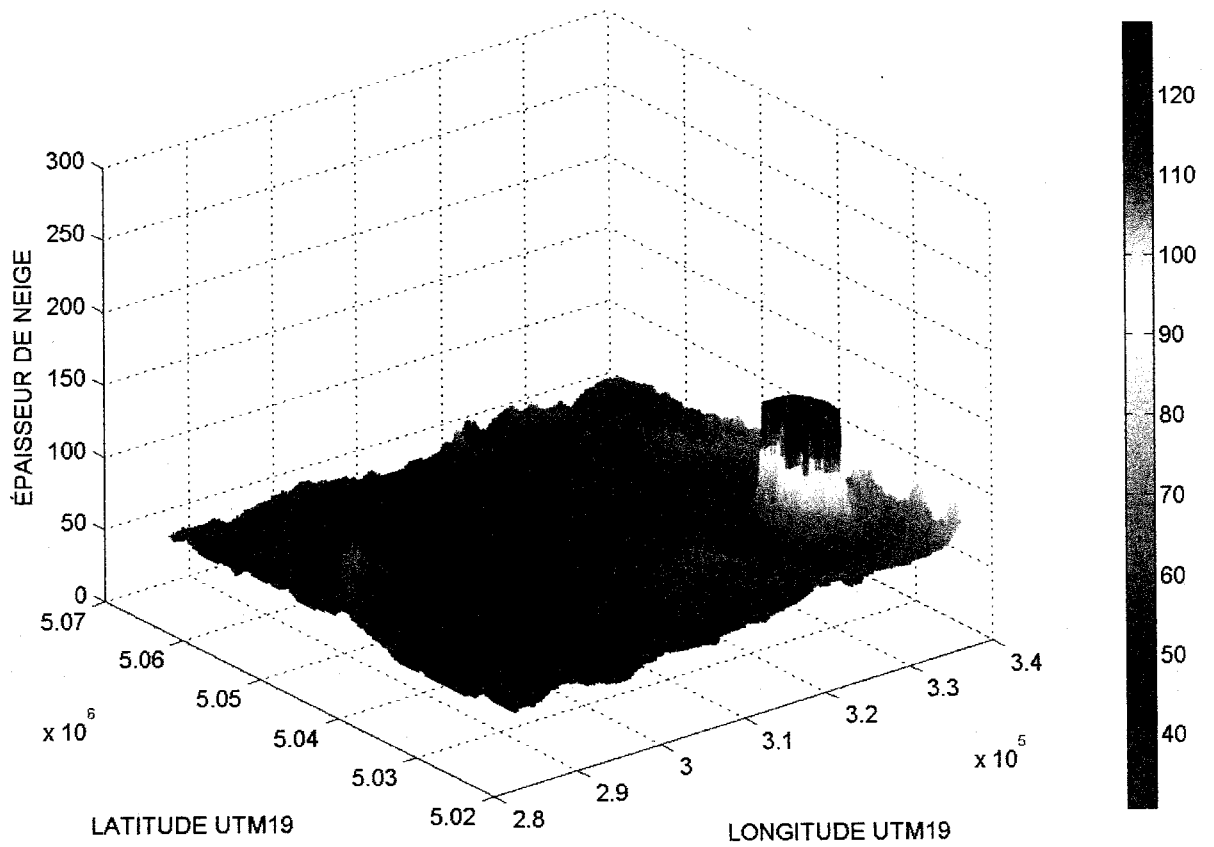
ÉPAISSEUR DE NEIGE 31 MARS 2007 (CM)



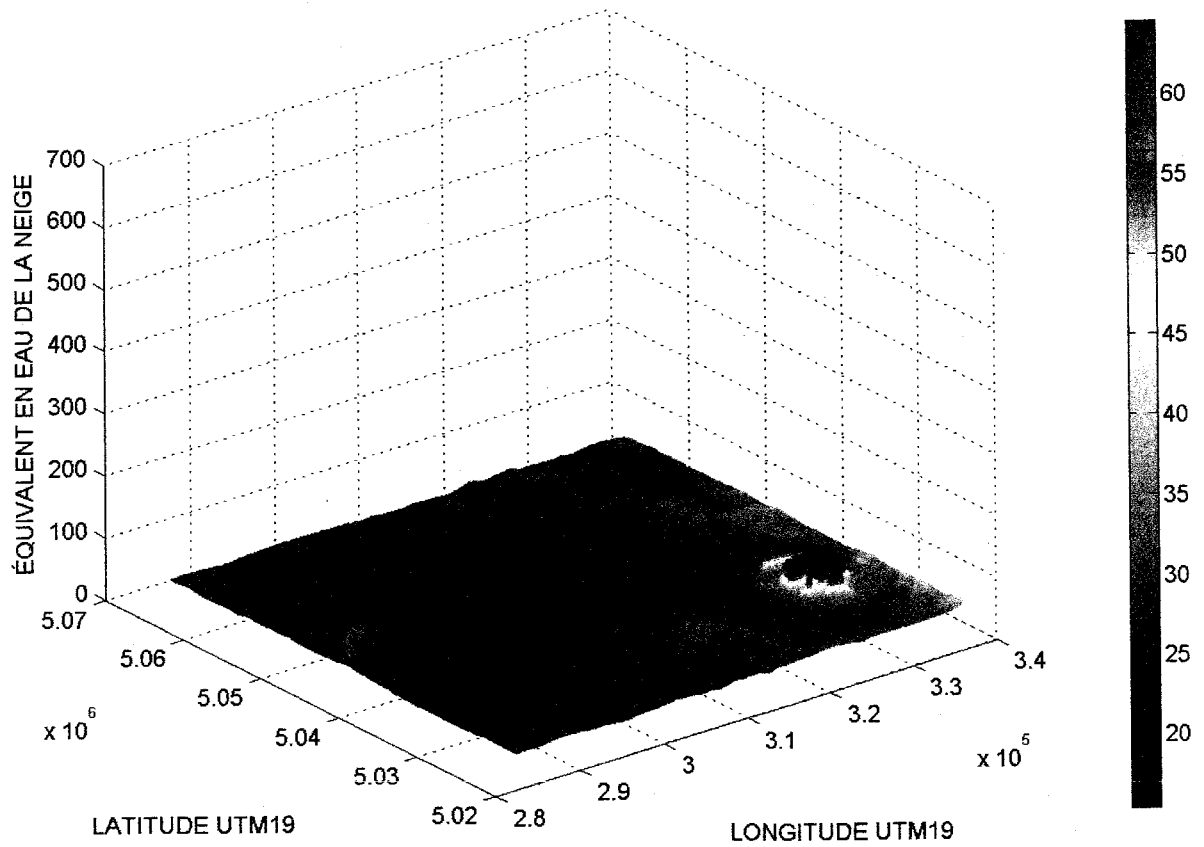
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 31 MARS 2007 (MM)



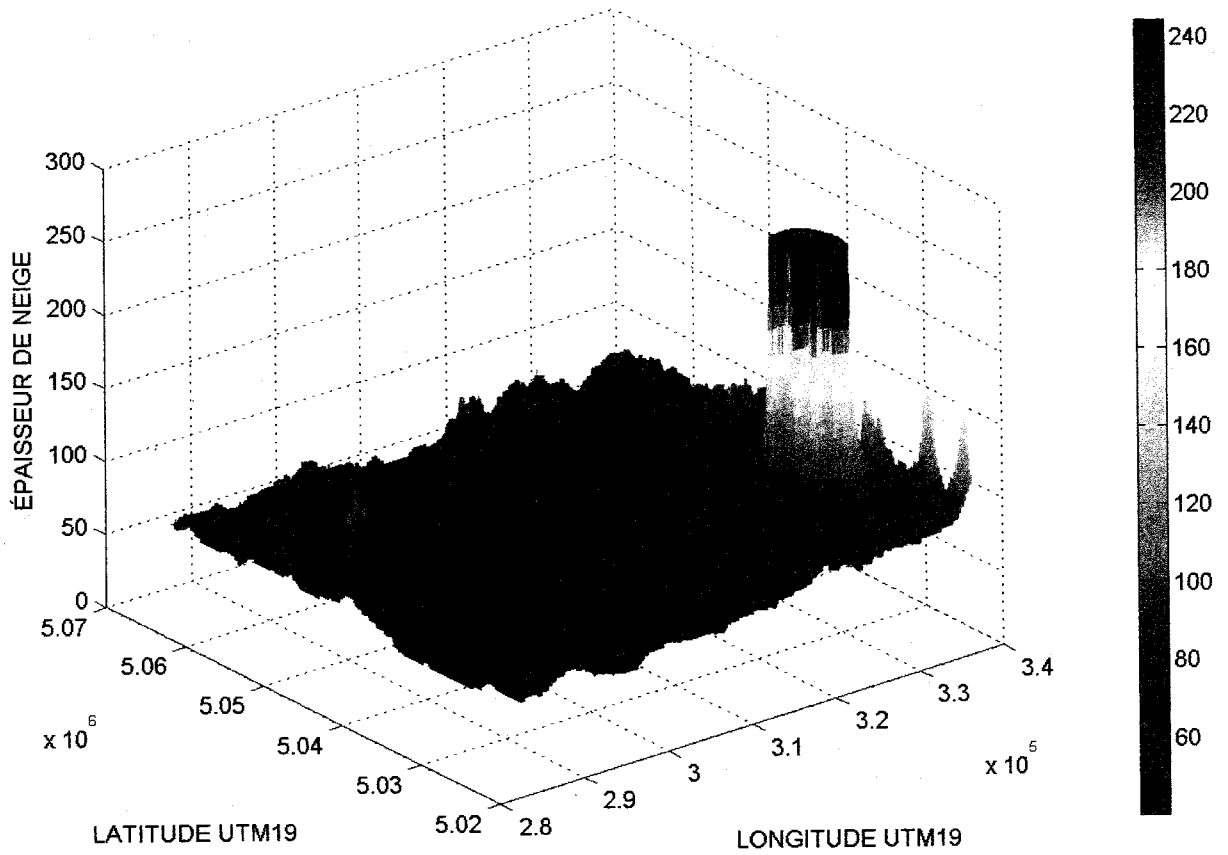
ÉPAISSEUR DE NEIGE 7 AVRIL 2007 (CM)



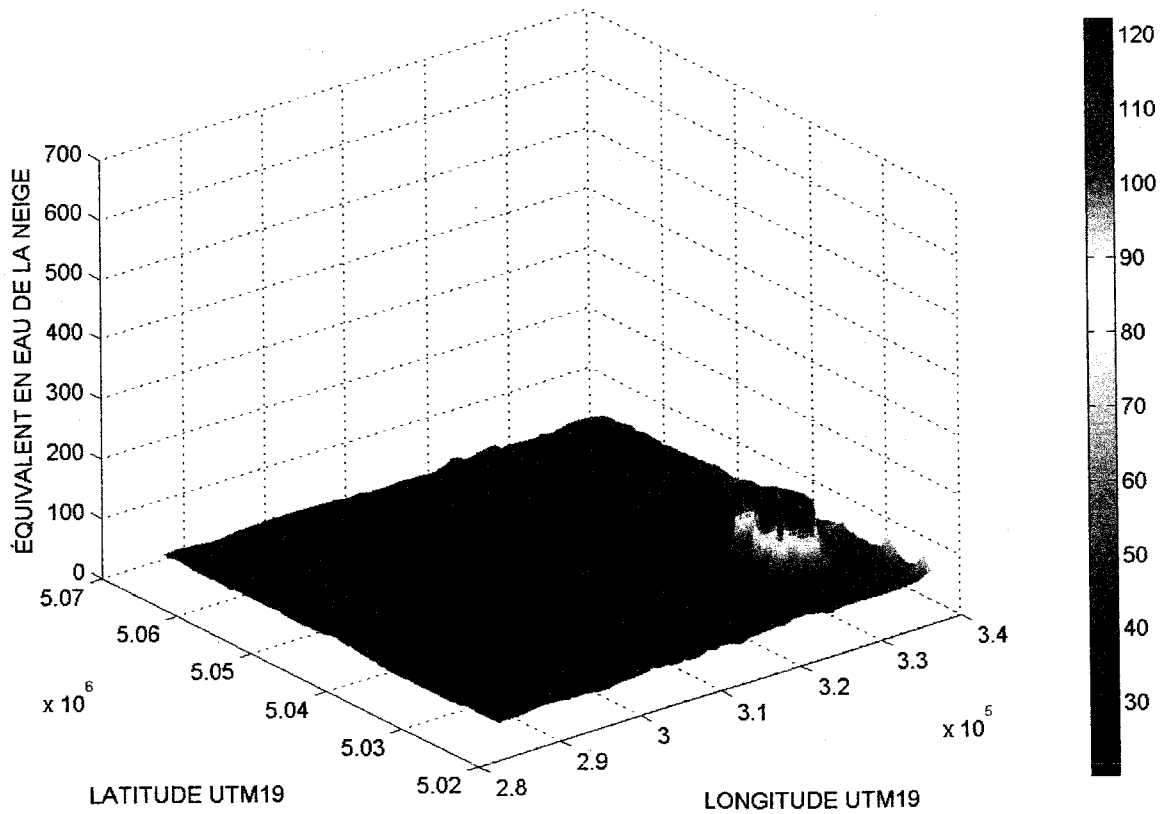
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 7 AVRIL 2007 (MM)



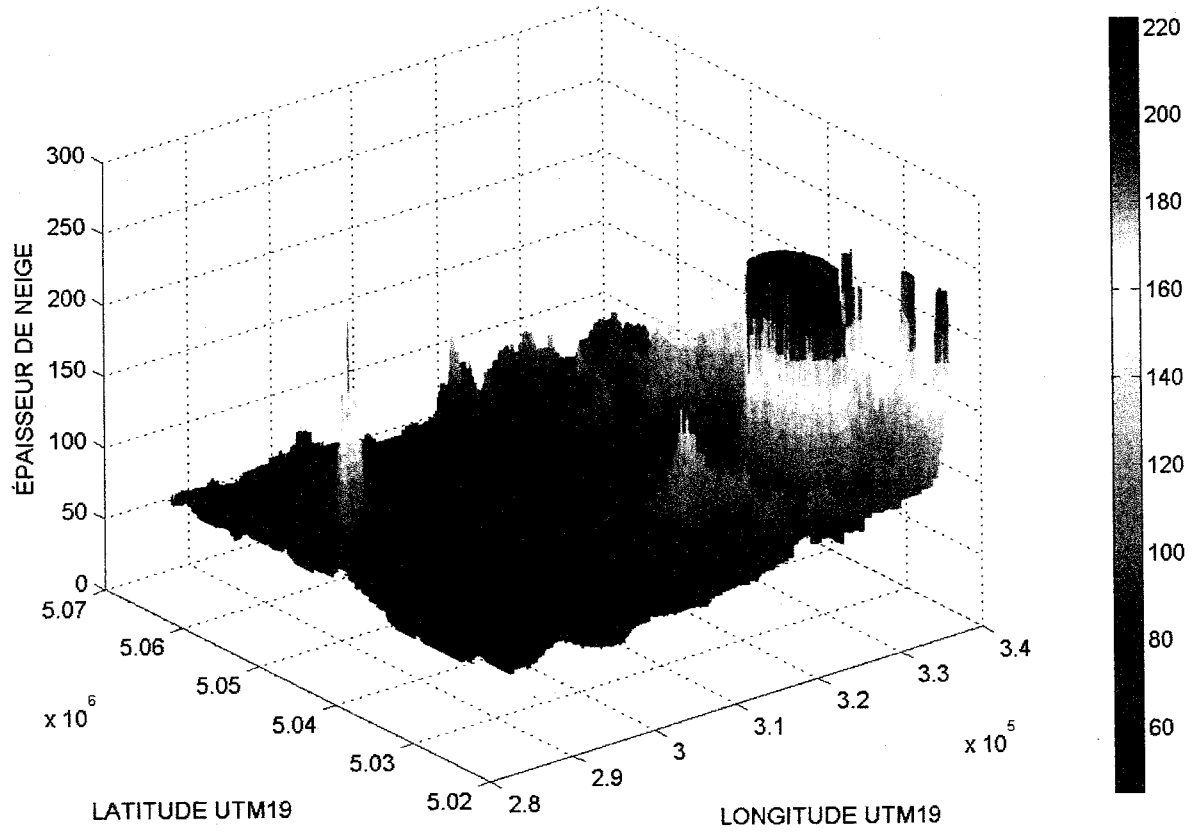
ÉPAISSEUR DE NEIGE 14 AVRIL 2007 (CM)



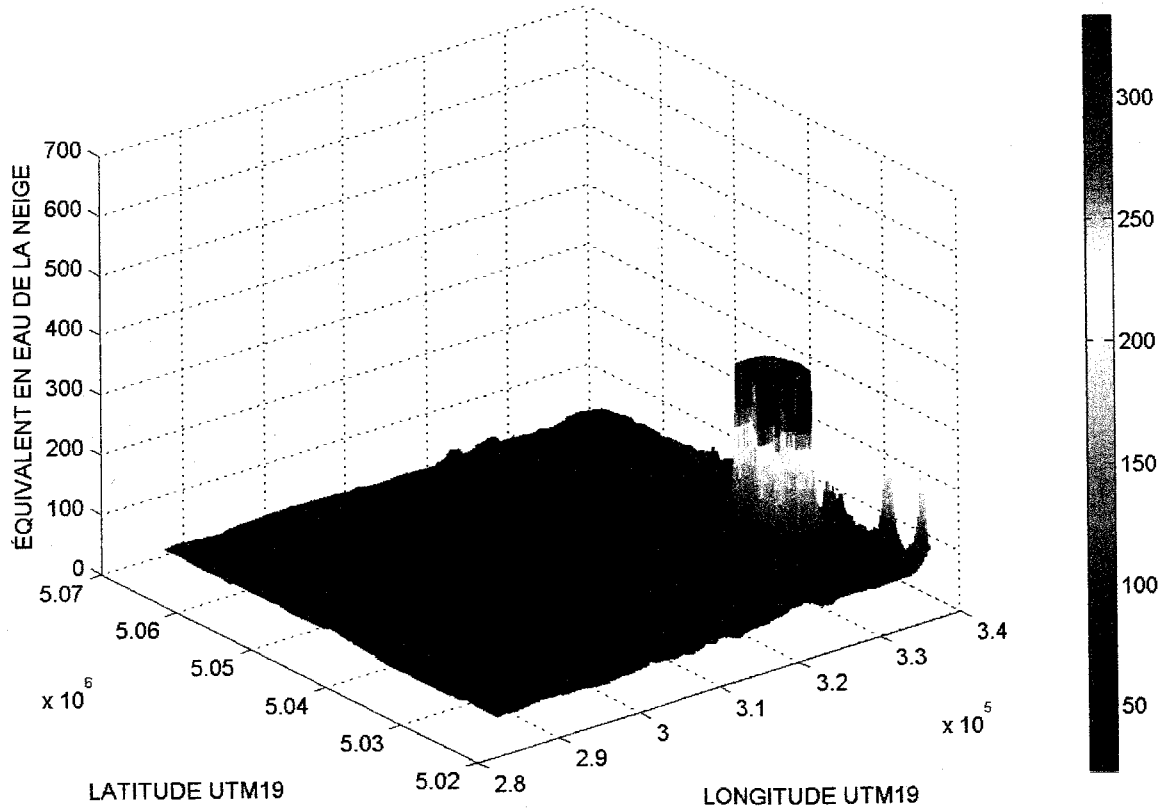
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 14 AVRIL 2007 (MM)



ÉPAISSEUR DE NEIGE 21 AVRIL 2007 (CM)

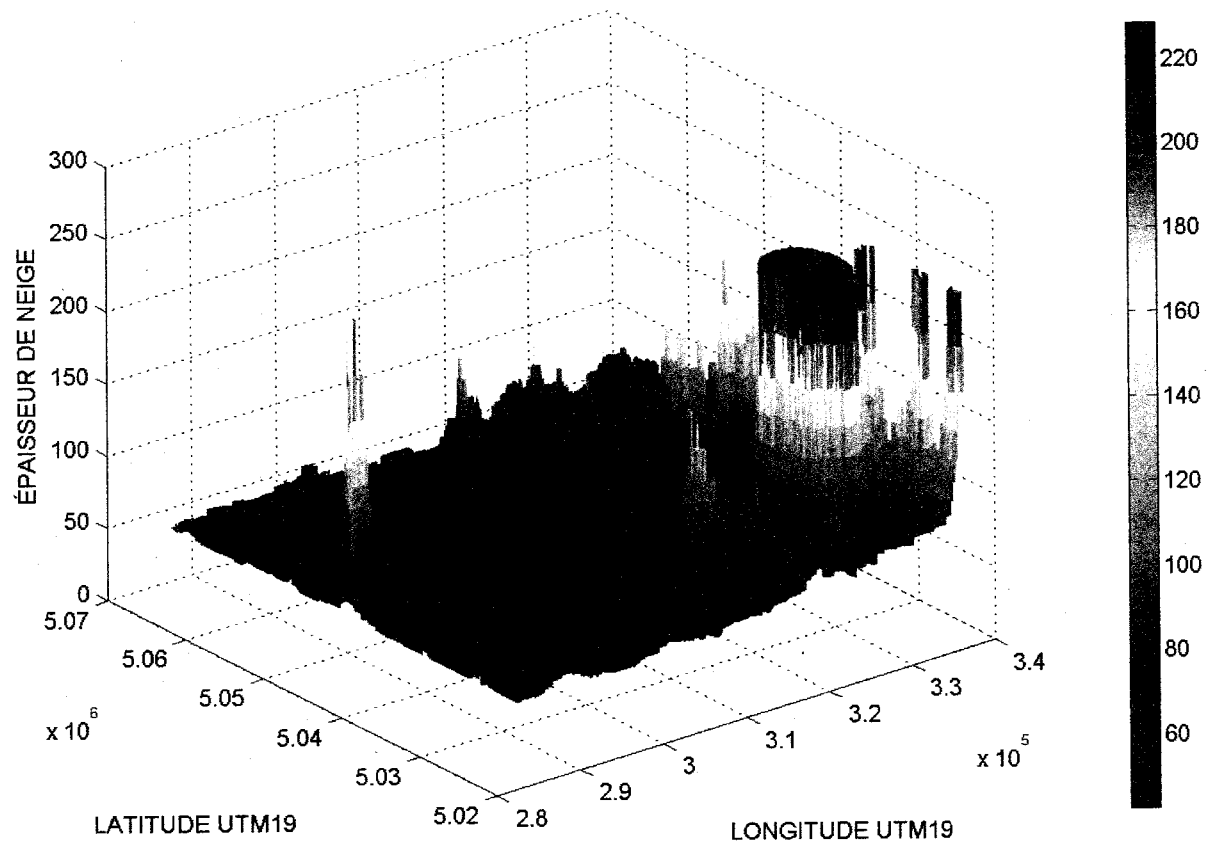


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 21 AVRIL 2007 (MM)

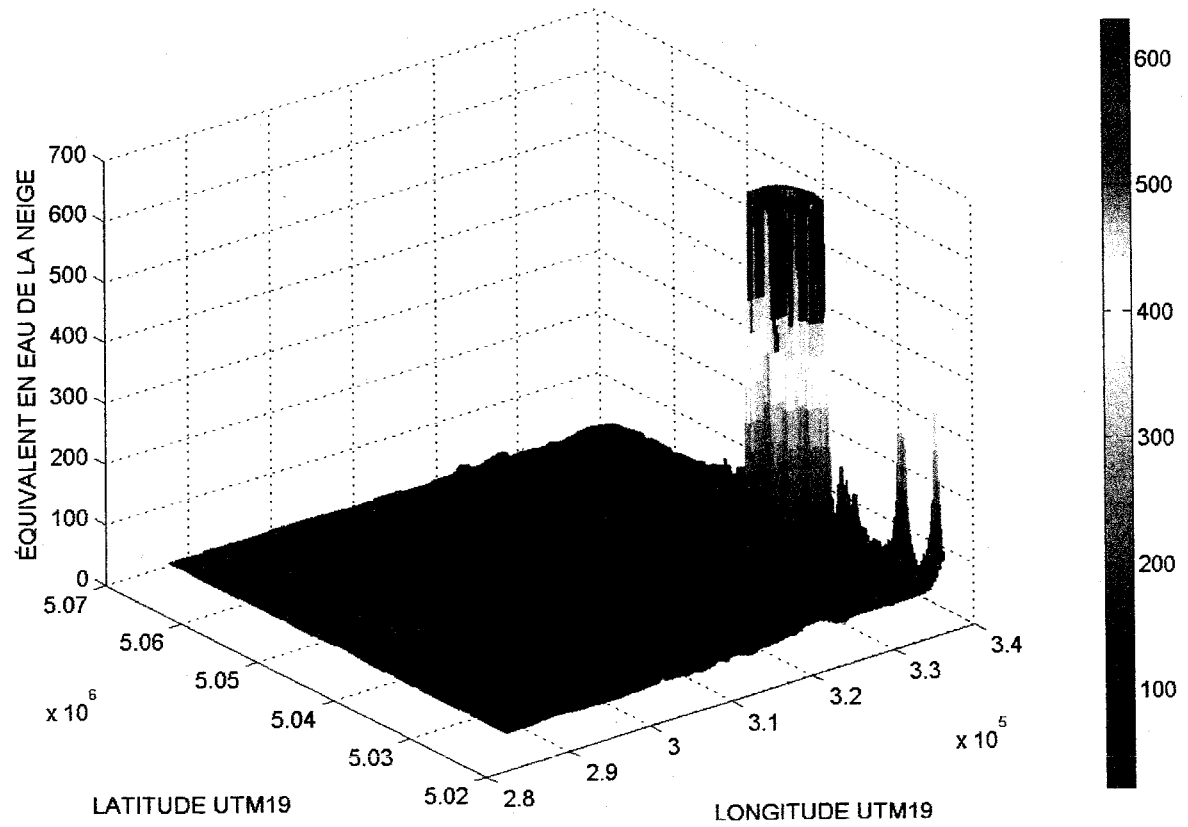




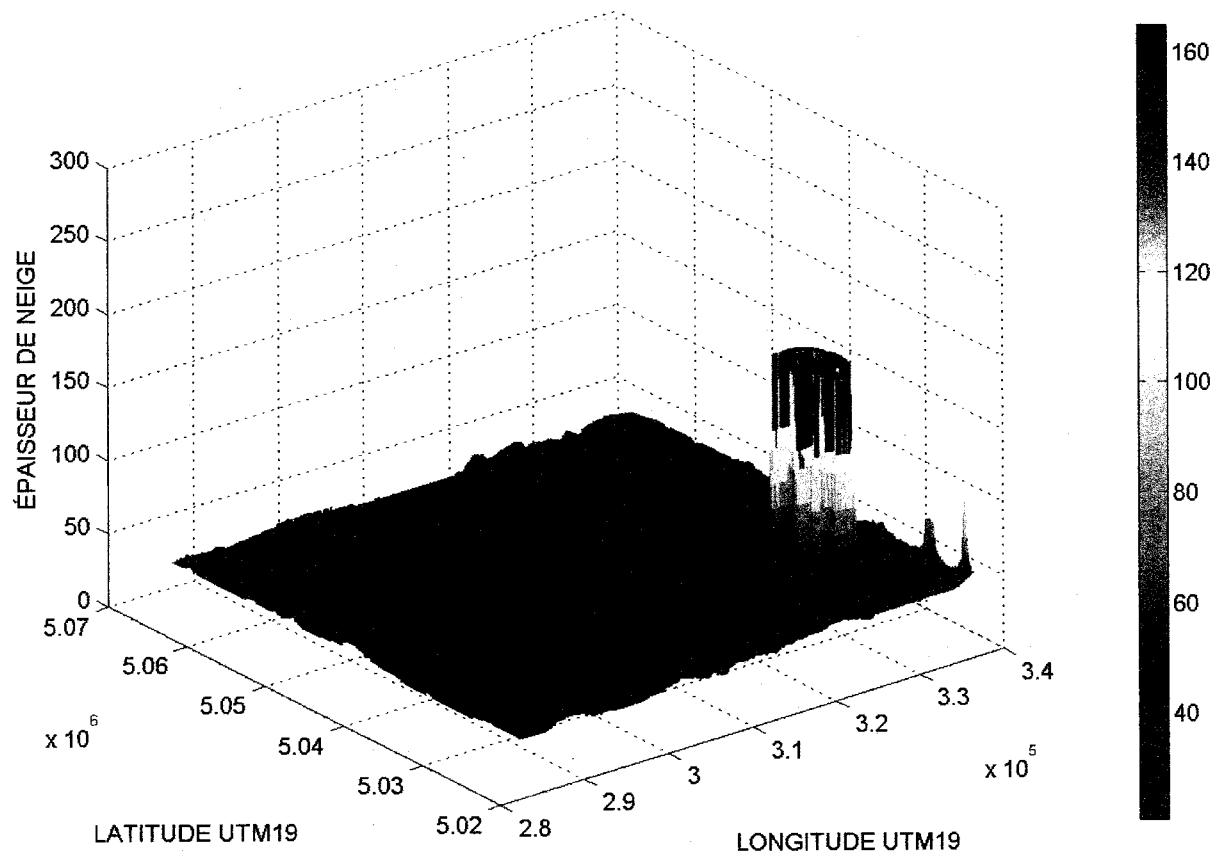
ÉPAISSEUR DE NEIGE 28 AVRIL 2007 (CM)



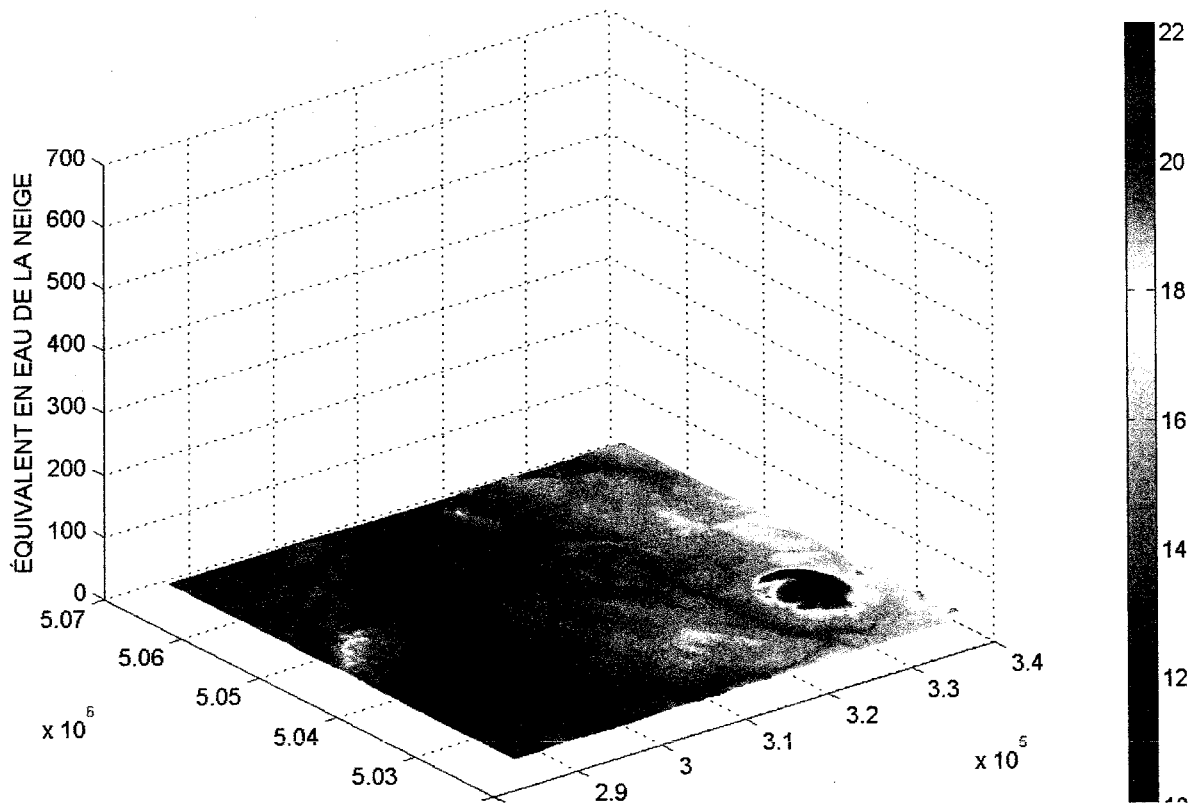
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 28 AVRIL 2007 (MM)



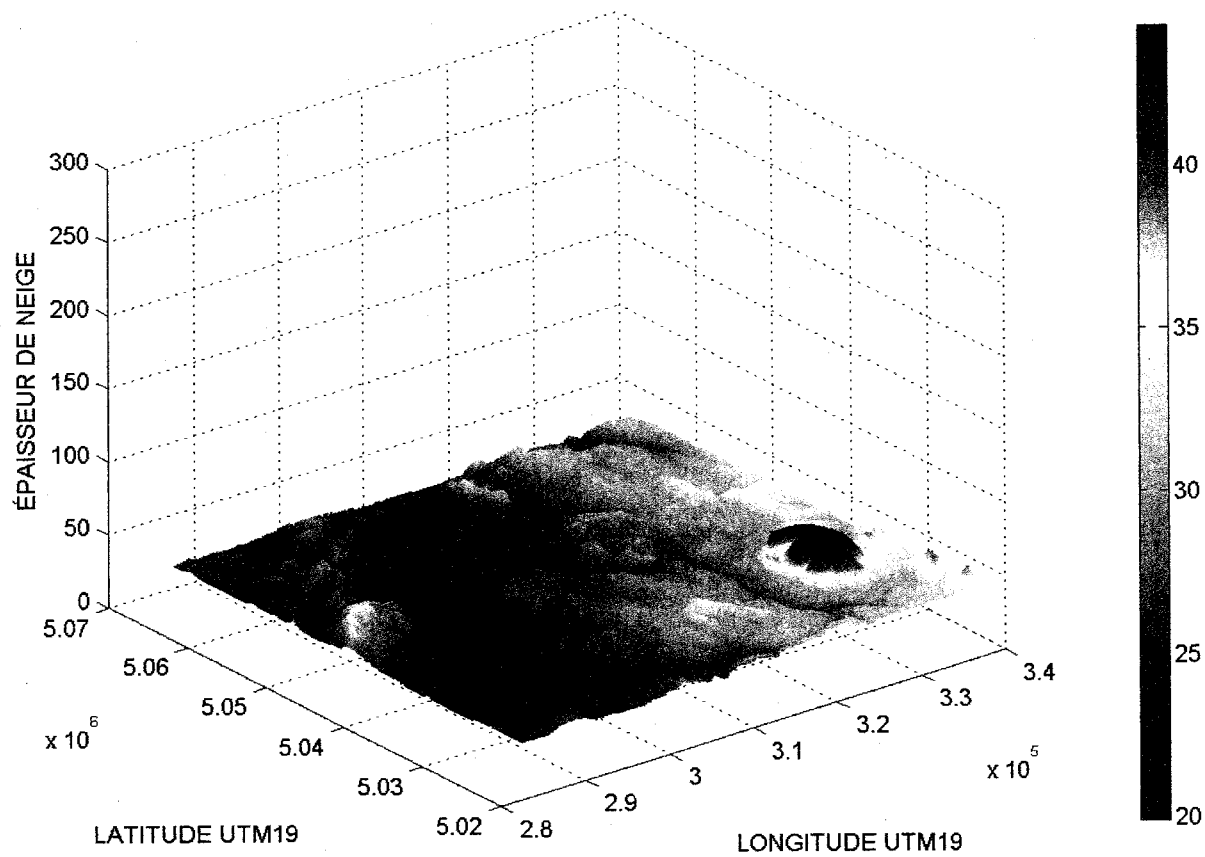
ÉPAISSEUR DE NEIGE 12 MAI 2007 (CM)



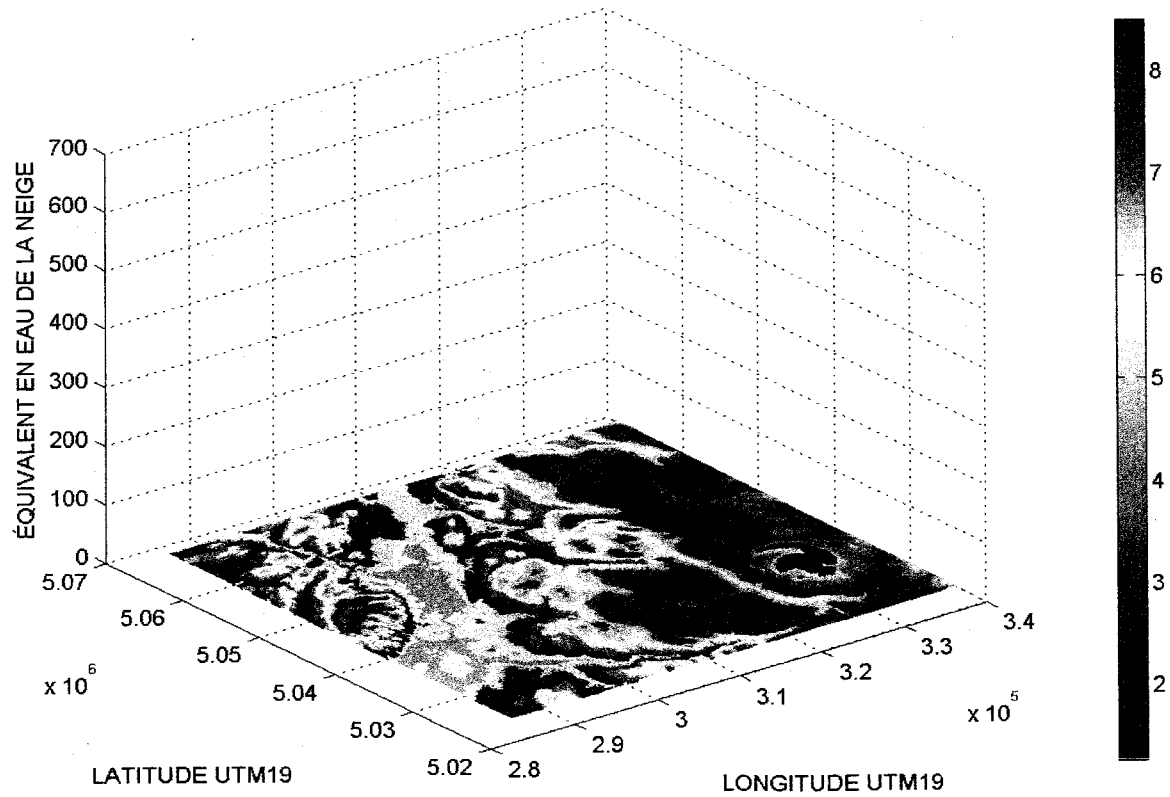
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 12 MAI 2007 (MM)



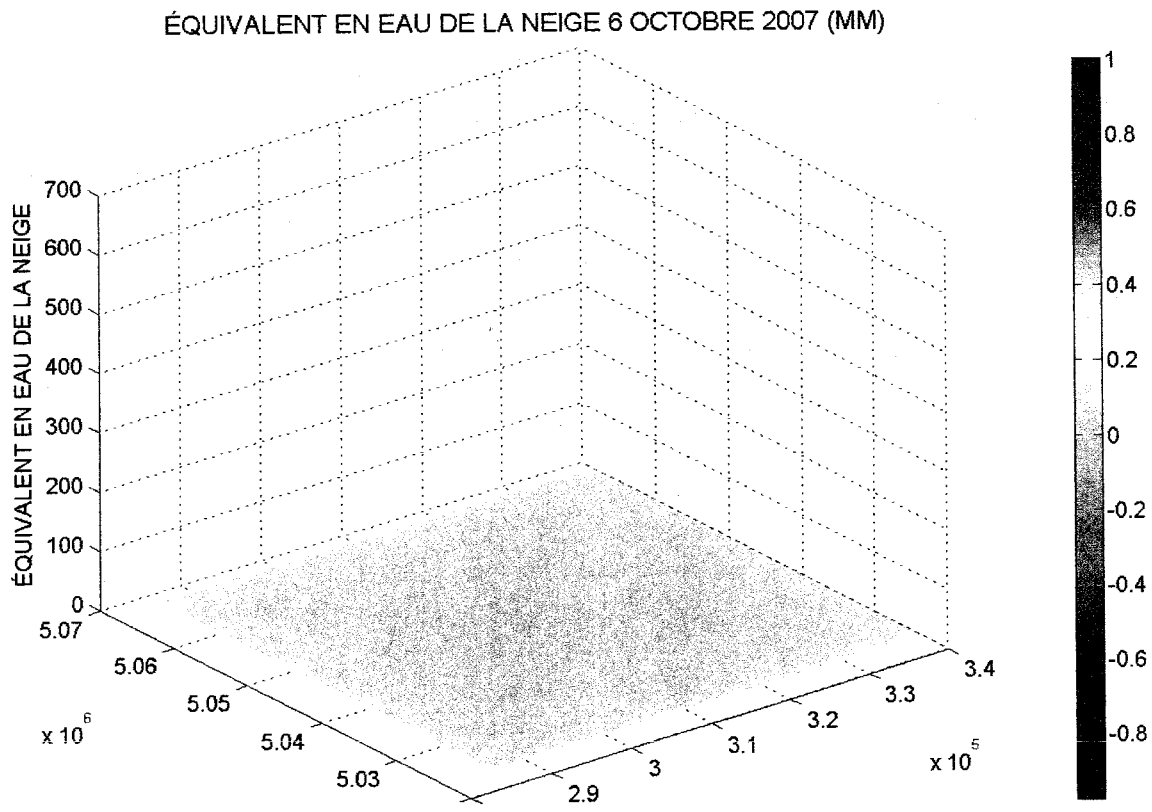
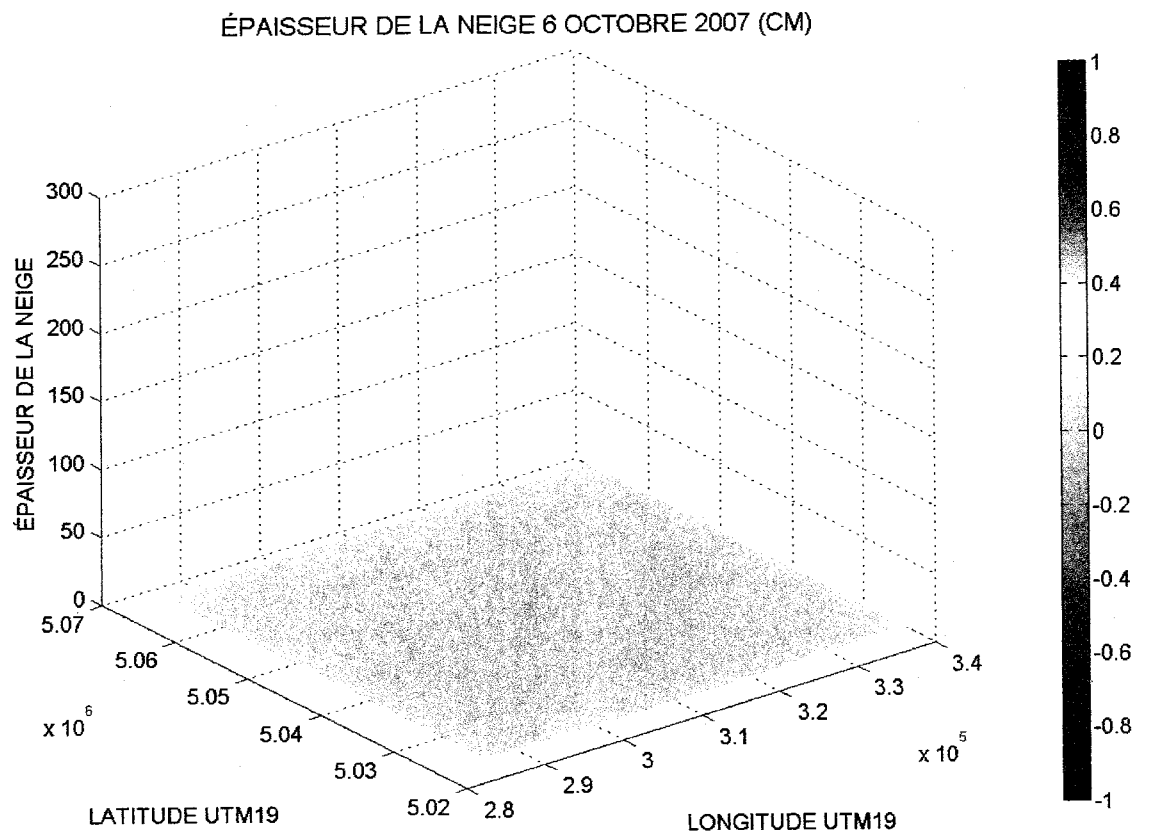
ÉPAISSEUR DE NEIGE 19 MAI 2007 (CM)



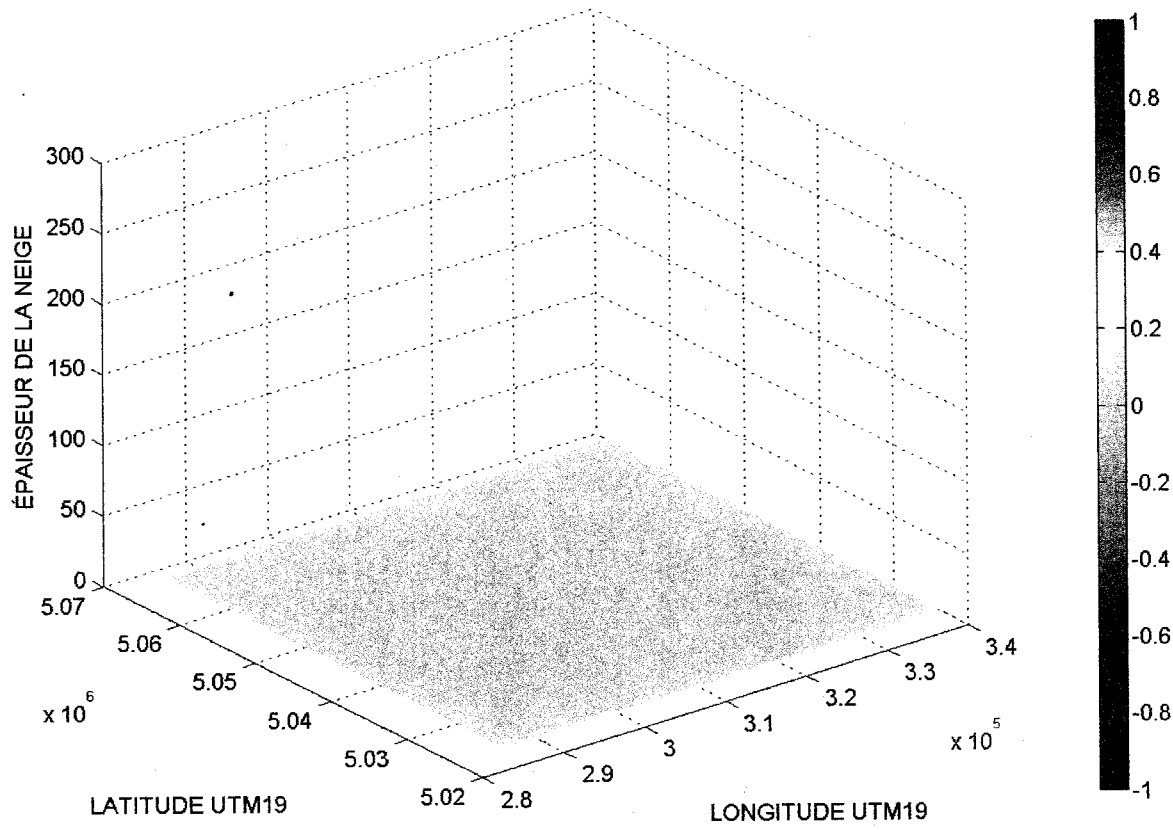
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 19 MAI 2007 (MM)



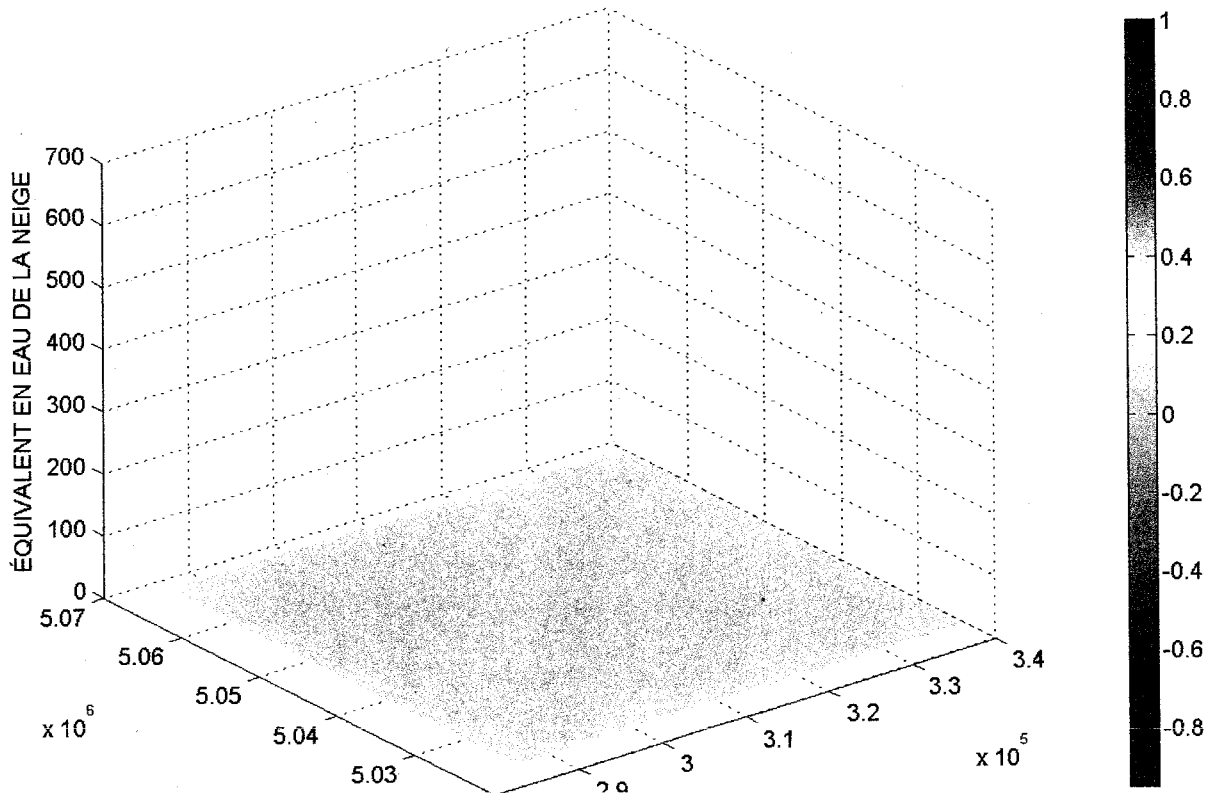
**Annexe 16 :** Cartes épaisseurs et équivalents eau de la neige sur le territoire pour la saison hivernale 2007-2008



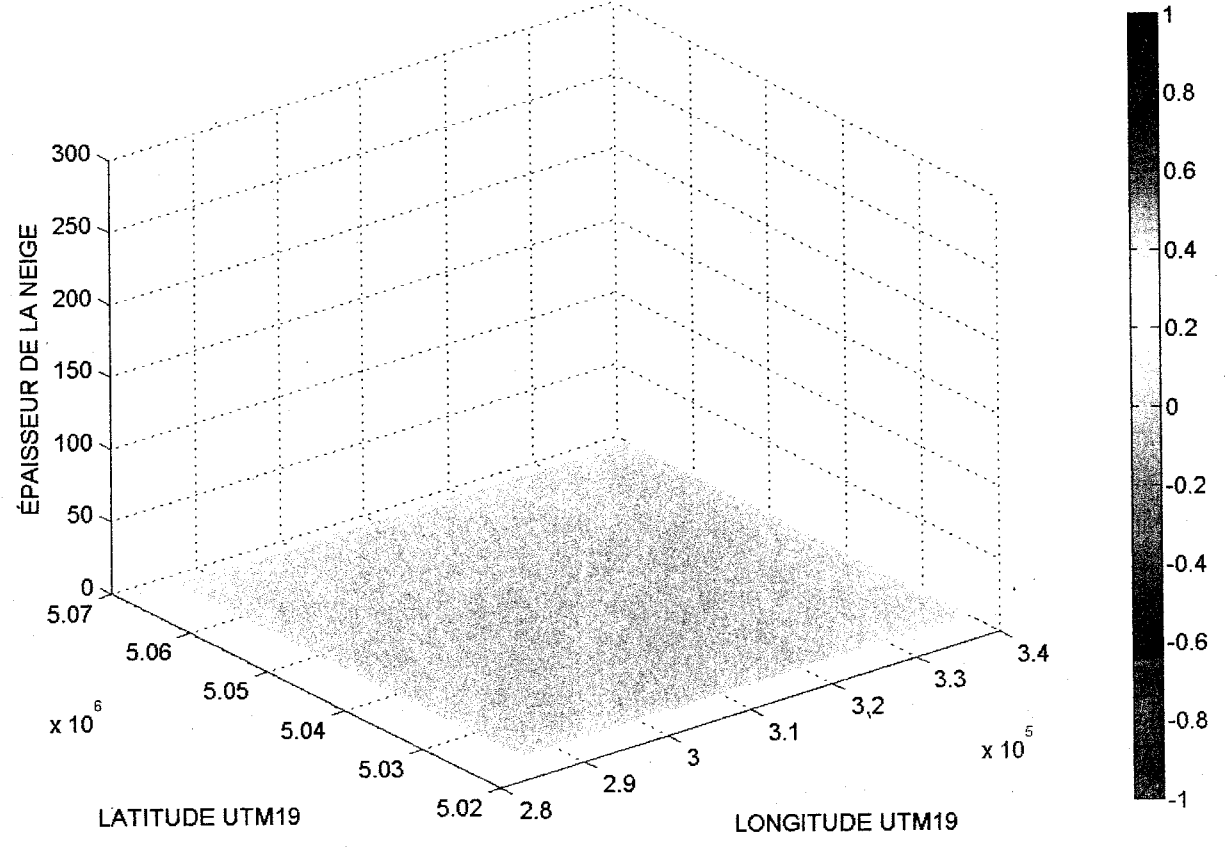
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 13 OCTOBRE 2007 (CM)



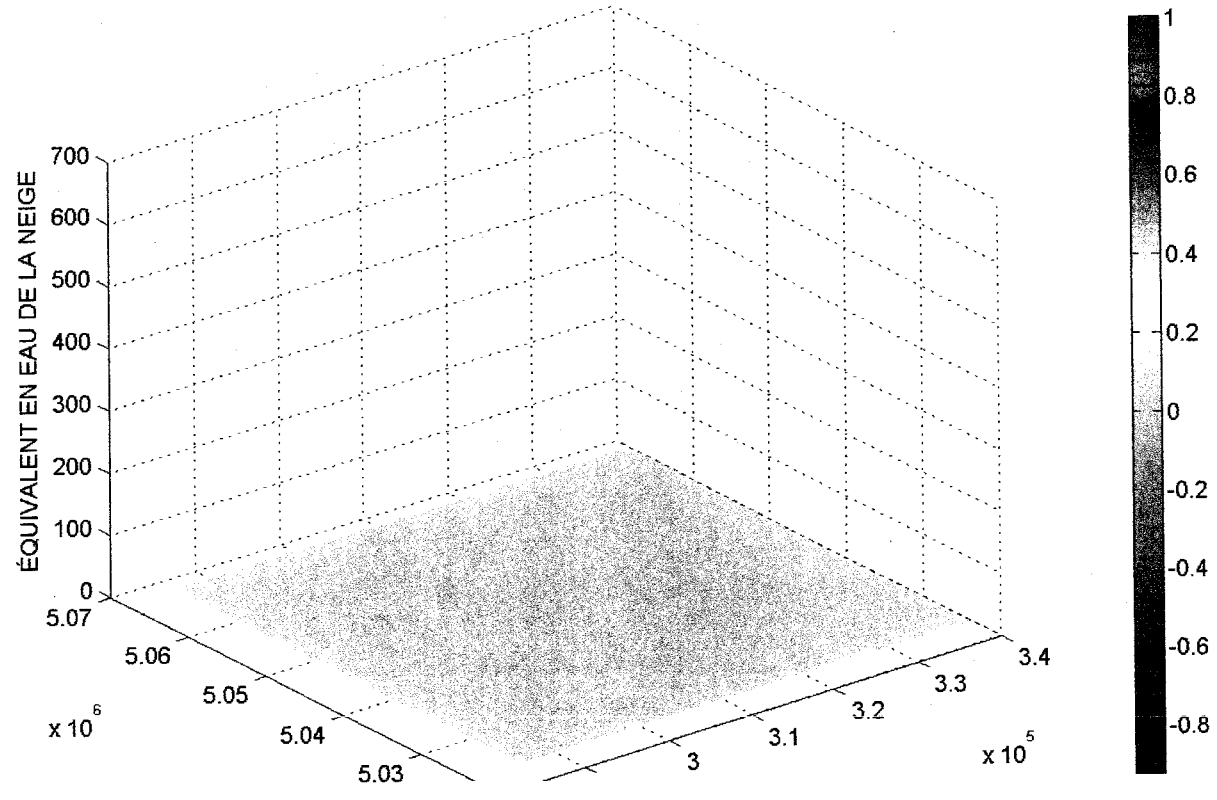
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 13 OCTOBRE 2007 (MM)



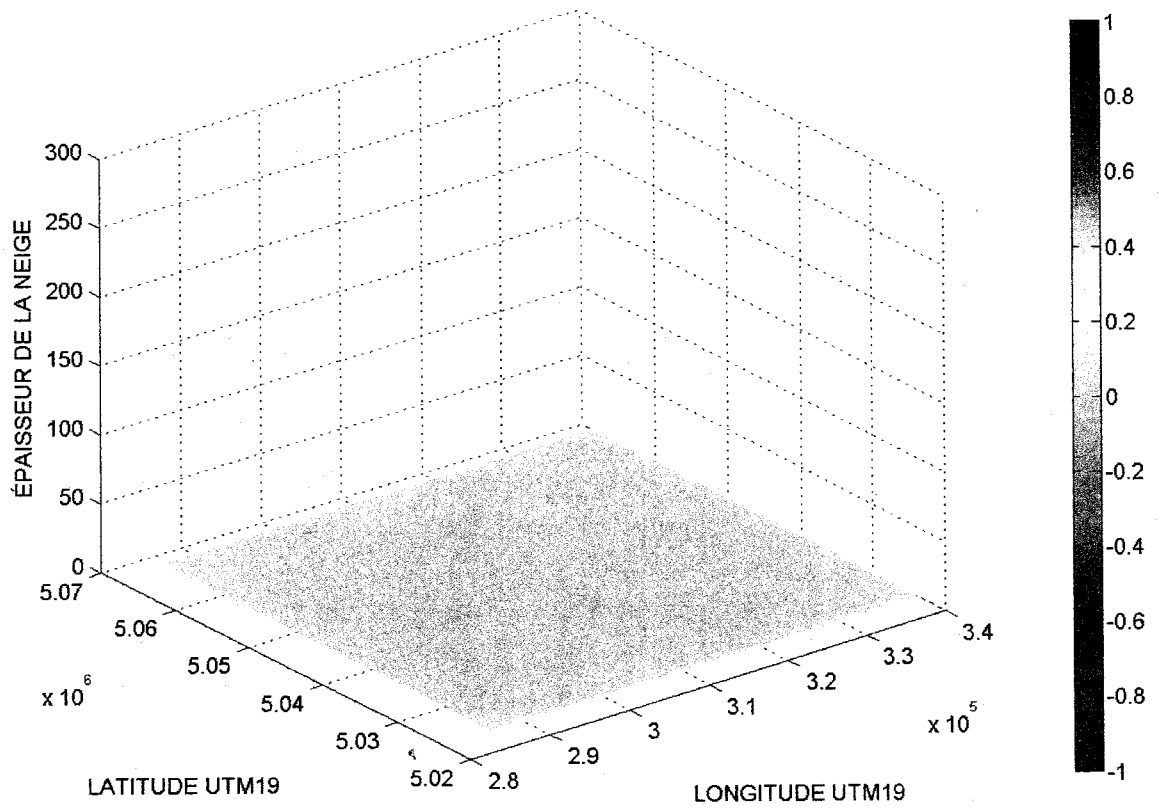
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 20 OCTOBRE 2007 (CM)



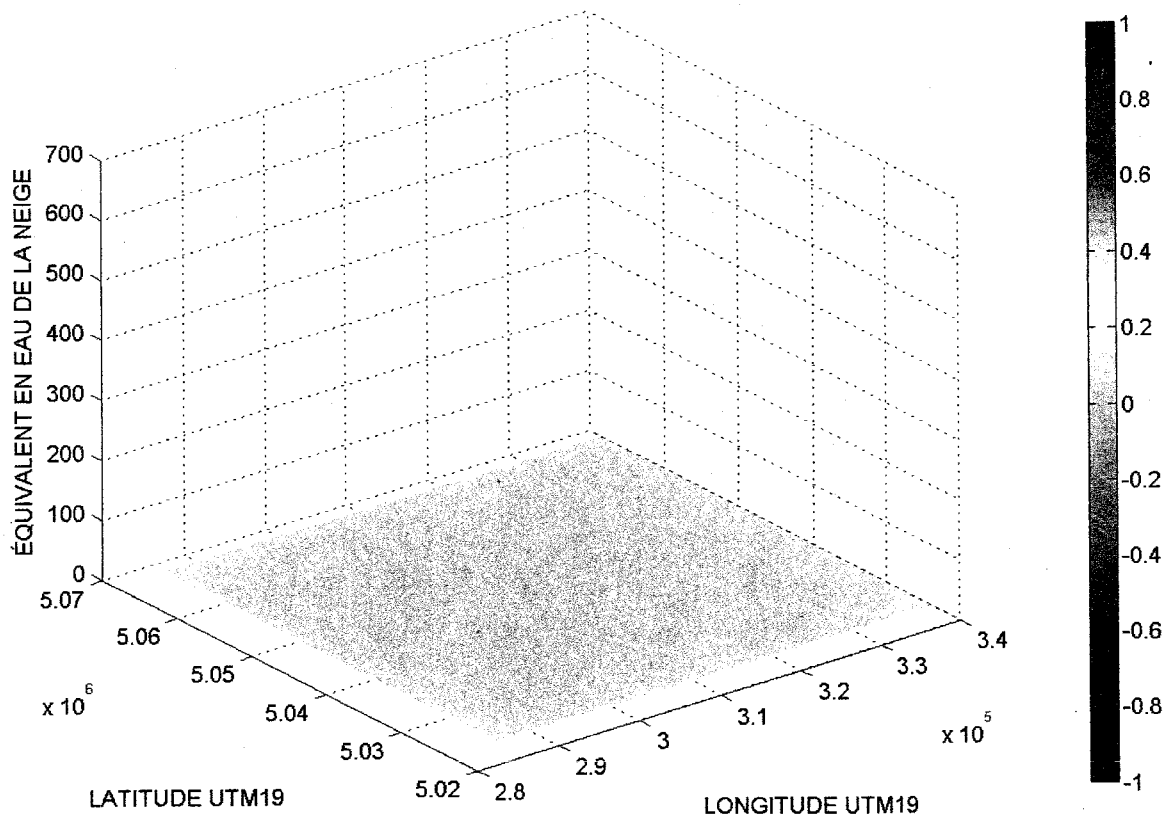
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 20 OCTOBRE 2007 (MM)



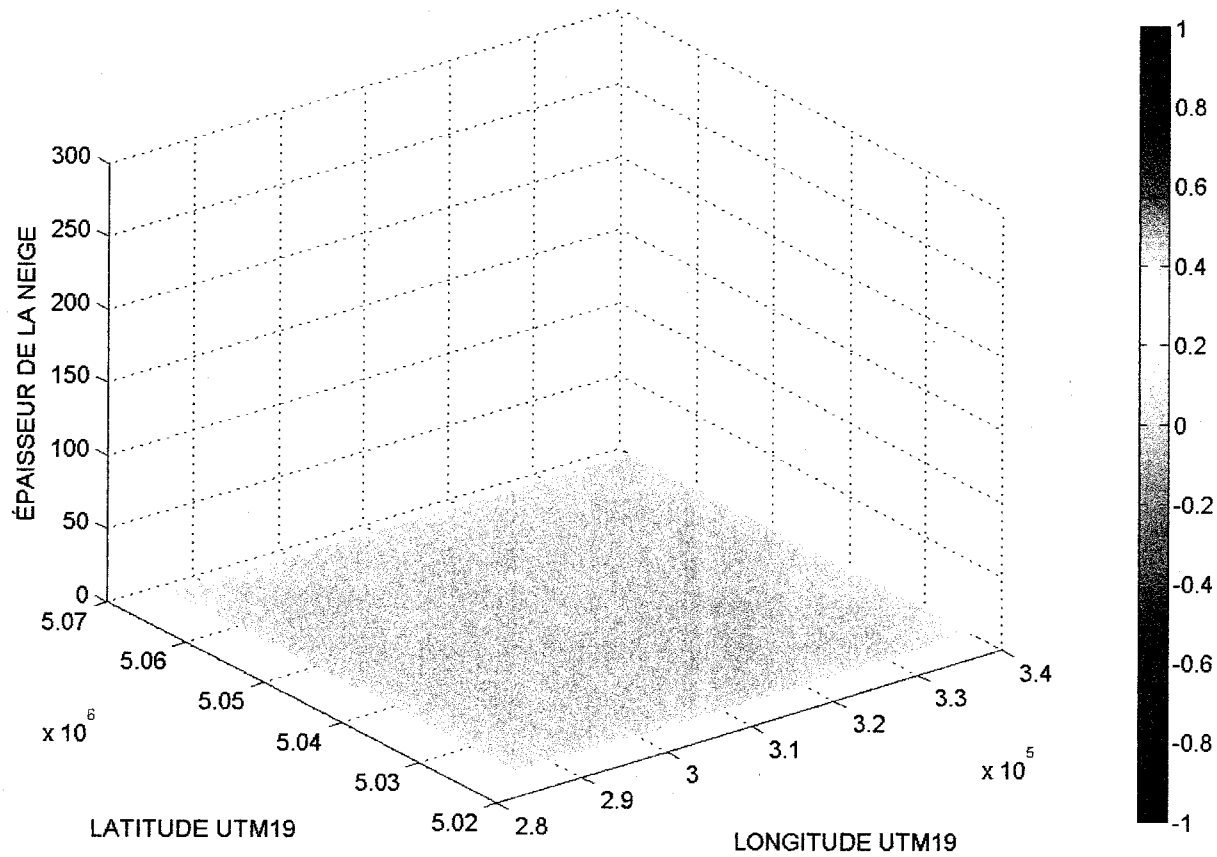
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 27 OCTOBRE 2007 (CM)



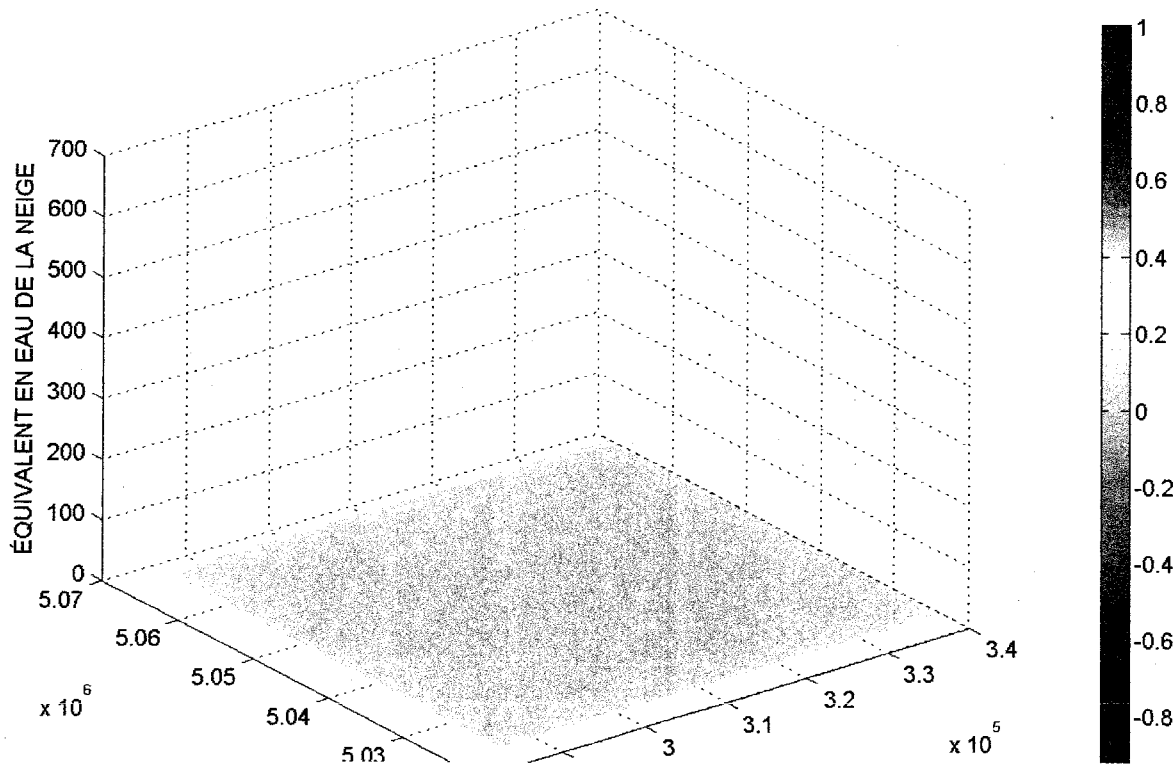
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 27 OCTOBRE 2007 (MM)



ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 3 NOVEMBRE 2007 (CM)

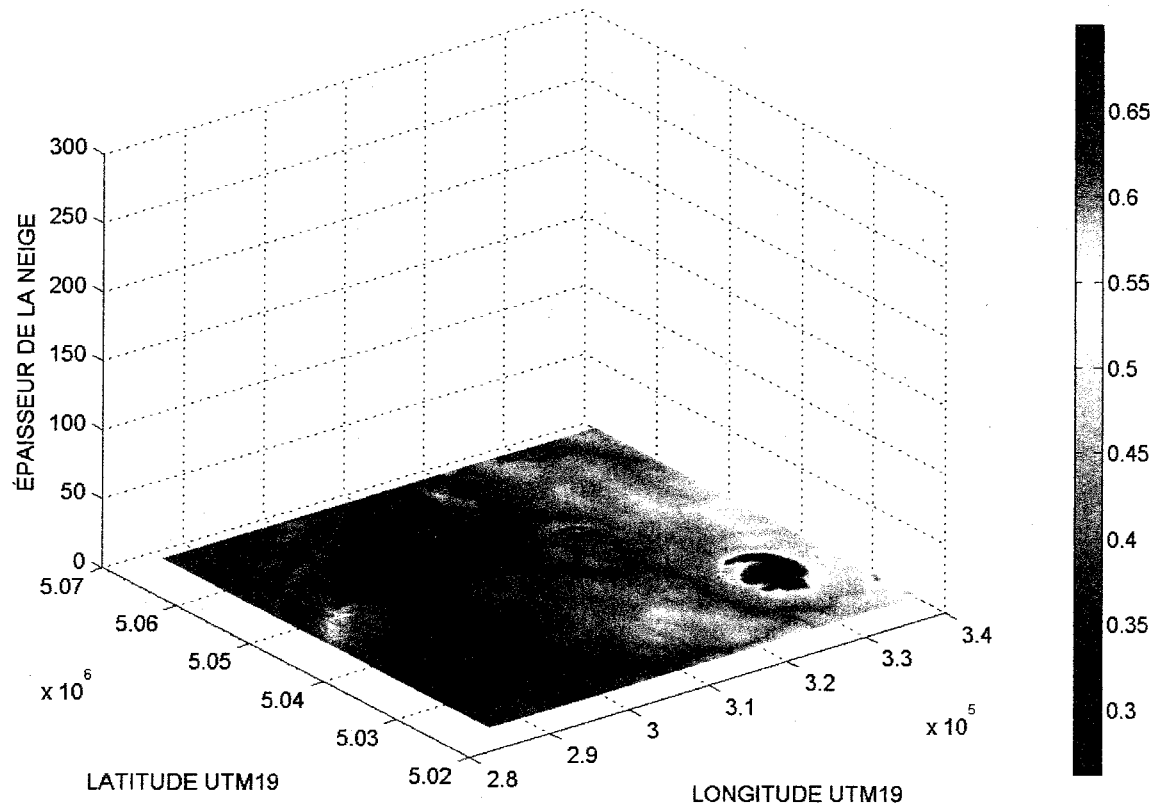


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 3 NOVEMBRE 2007 (MM)

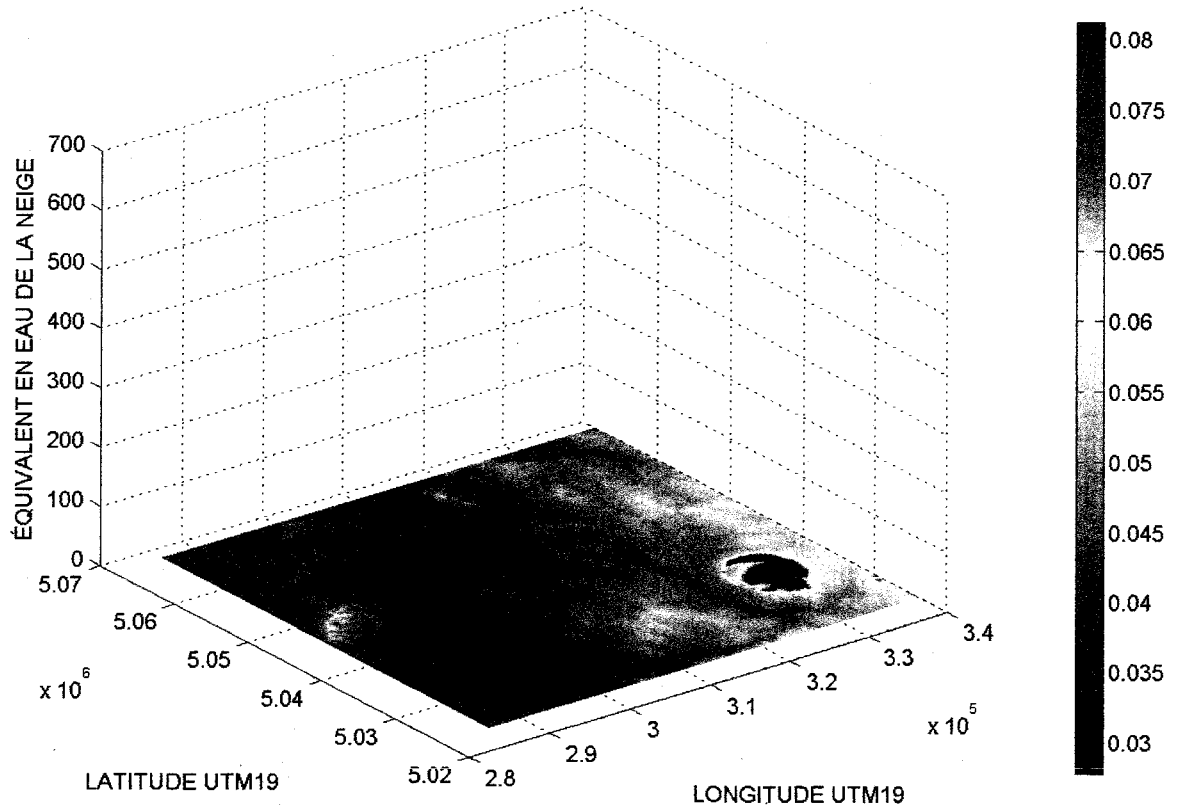




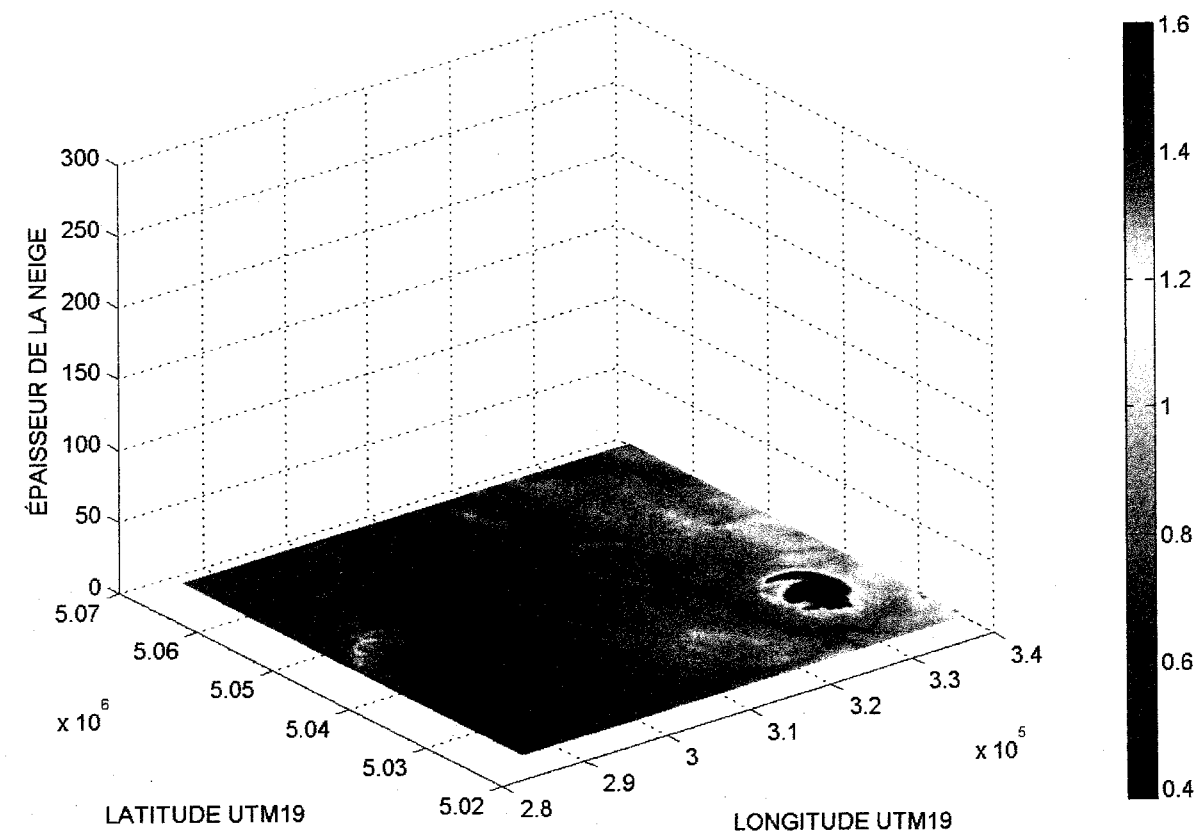
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 10 NOVEMBRE 2007 (CM)



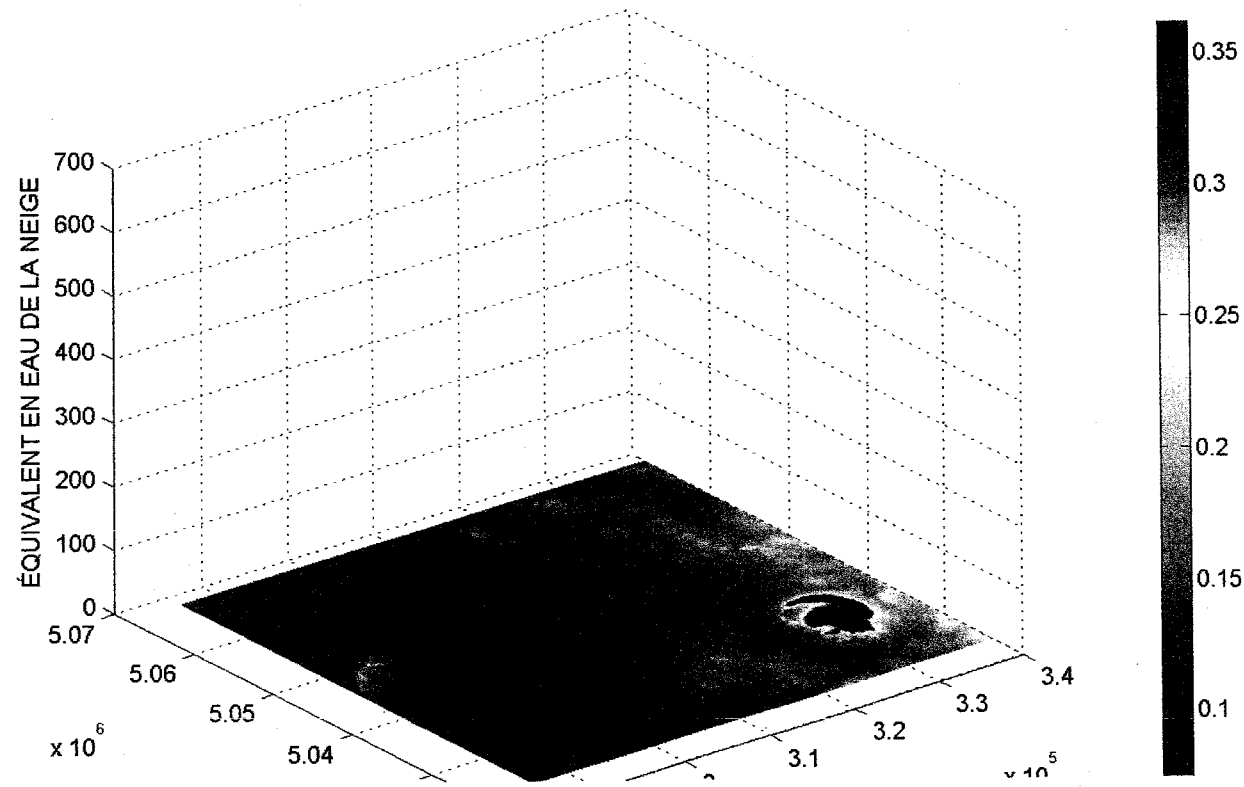
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 10 NOVEMBRE 2007 (MM)



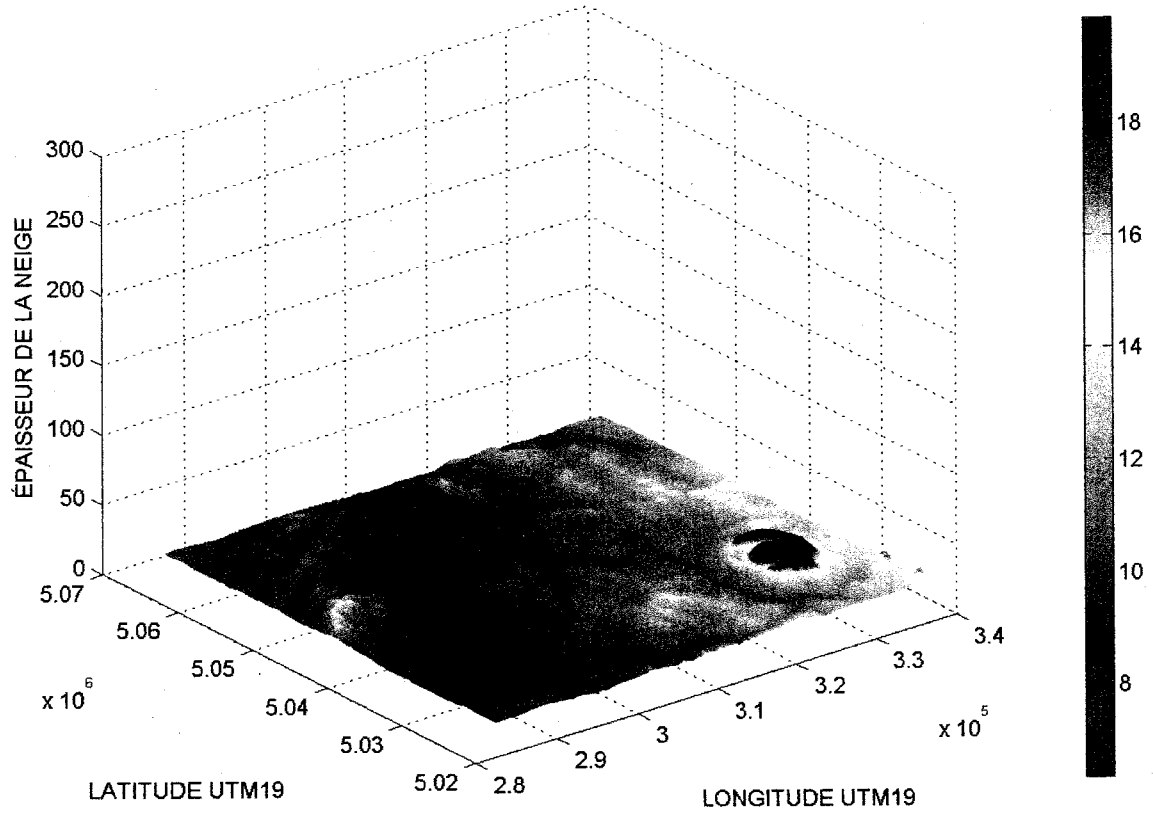
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 17 NOVEMBRE 2007 (CM)



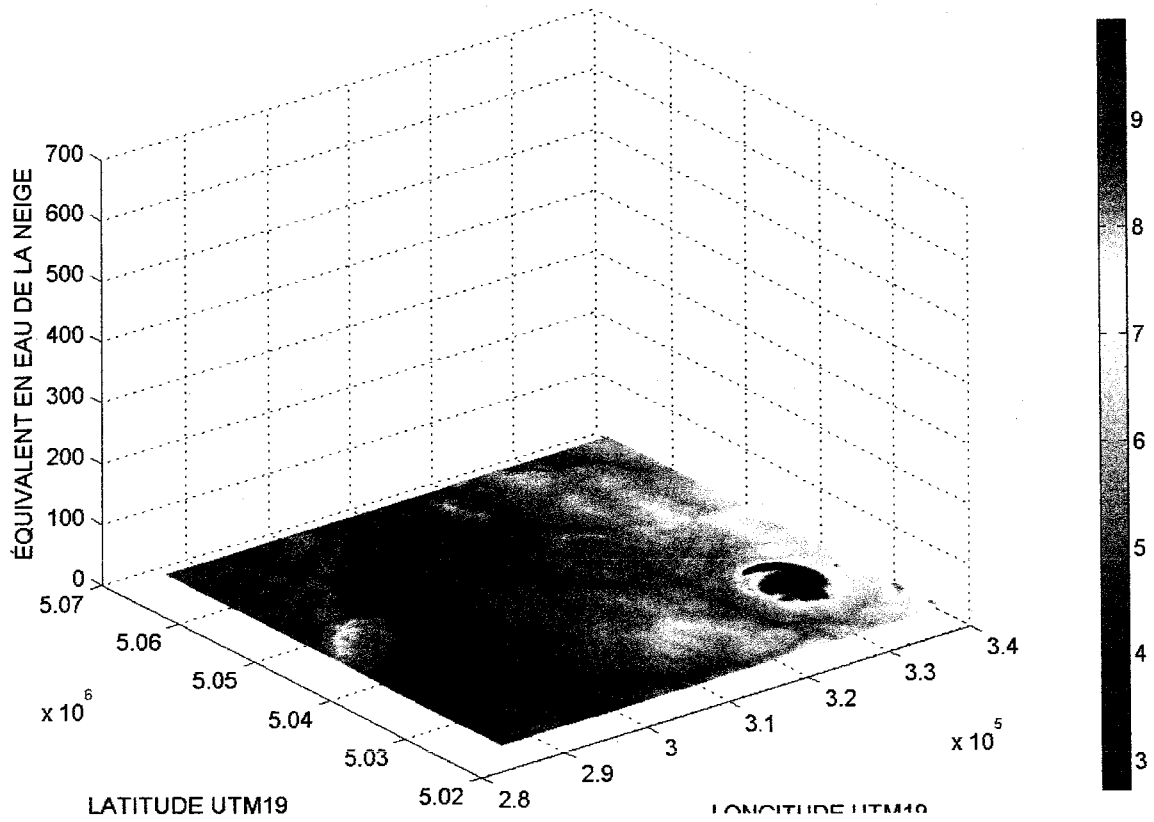
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 17 NOVEMBRE 2007 (MM)



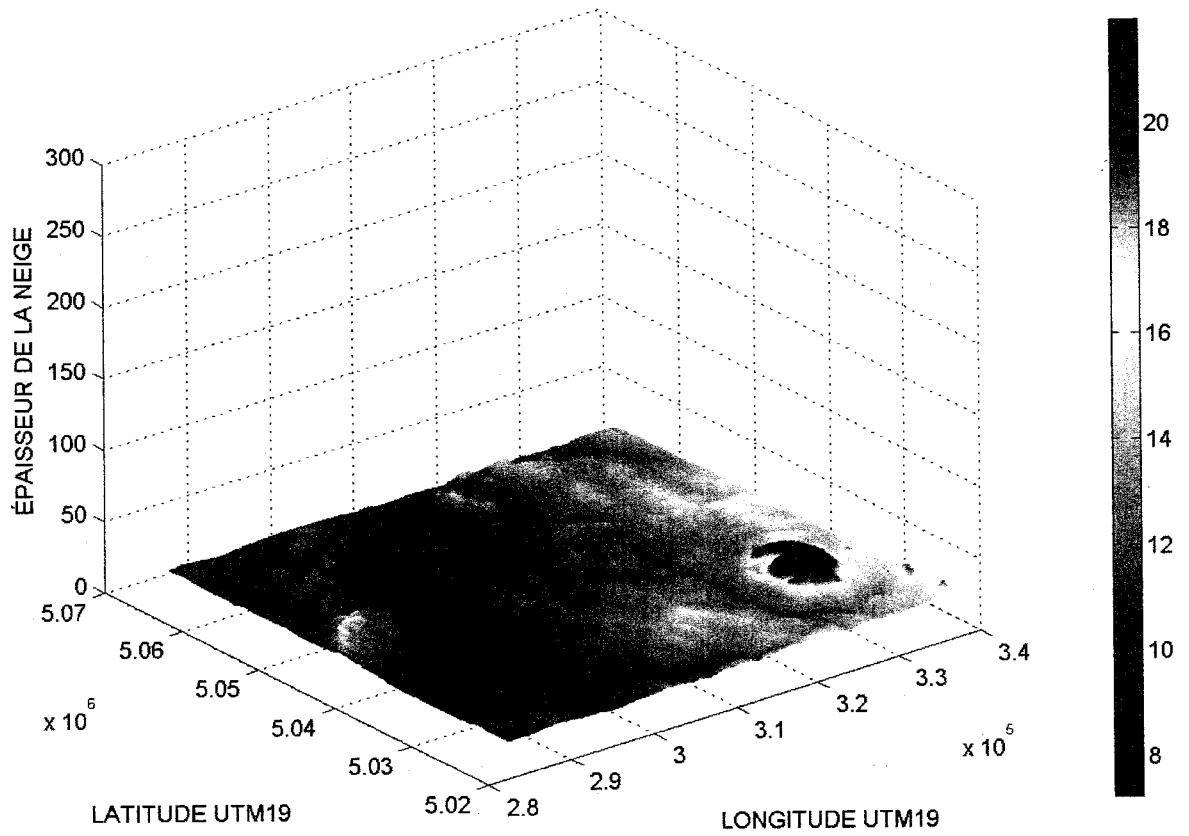
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 24 NOVEMBRE 2007 (CM)



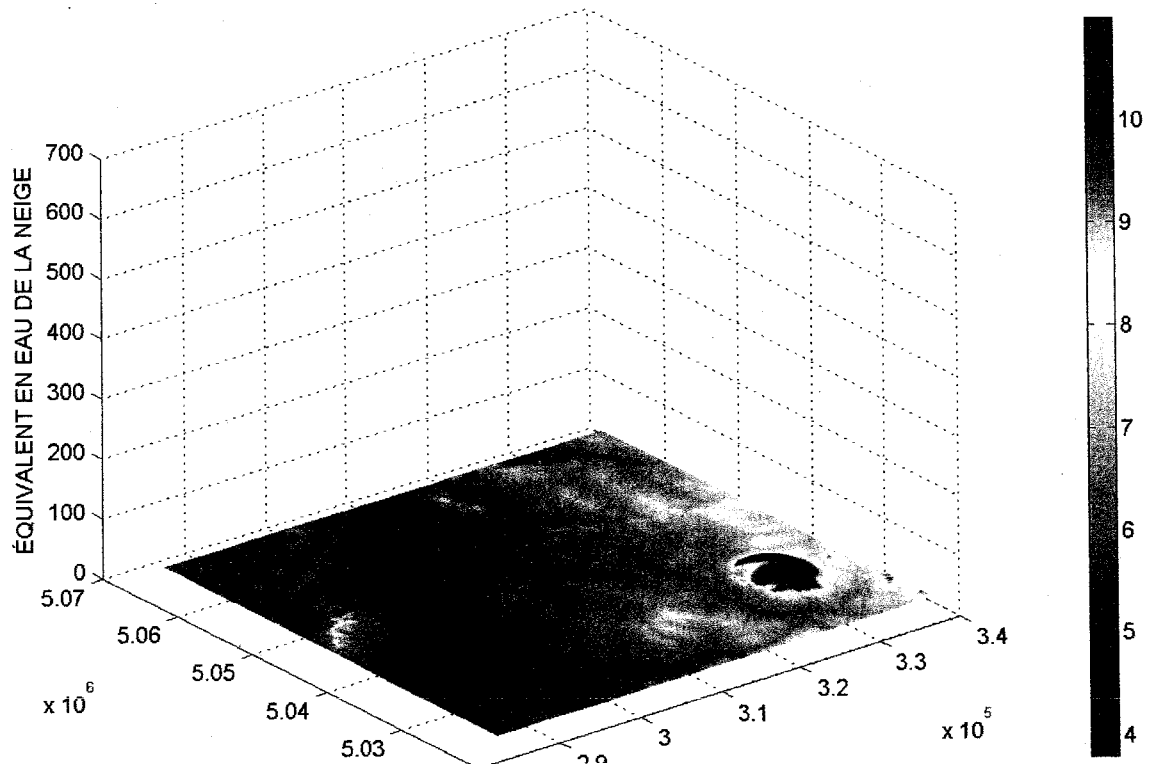
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 24 NOVEMBRE 2007 (MM)



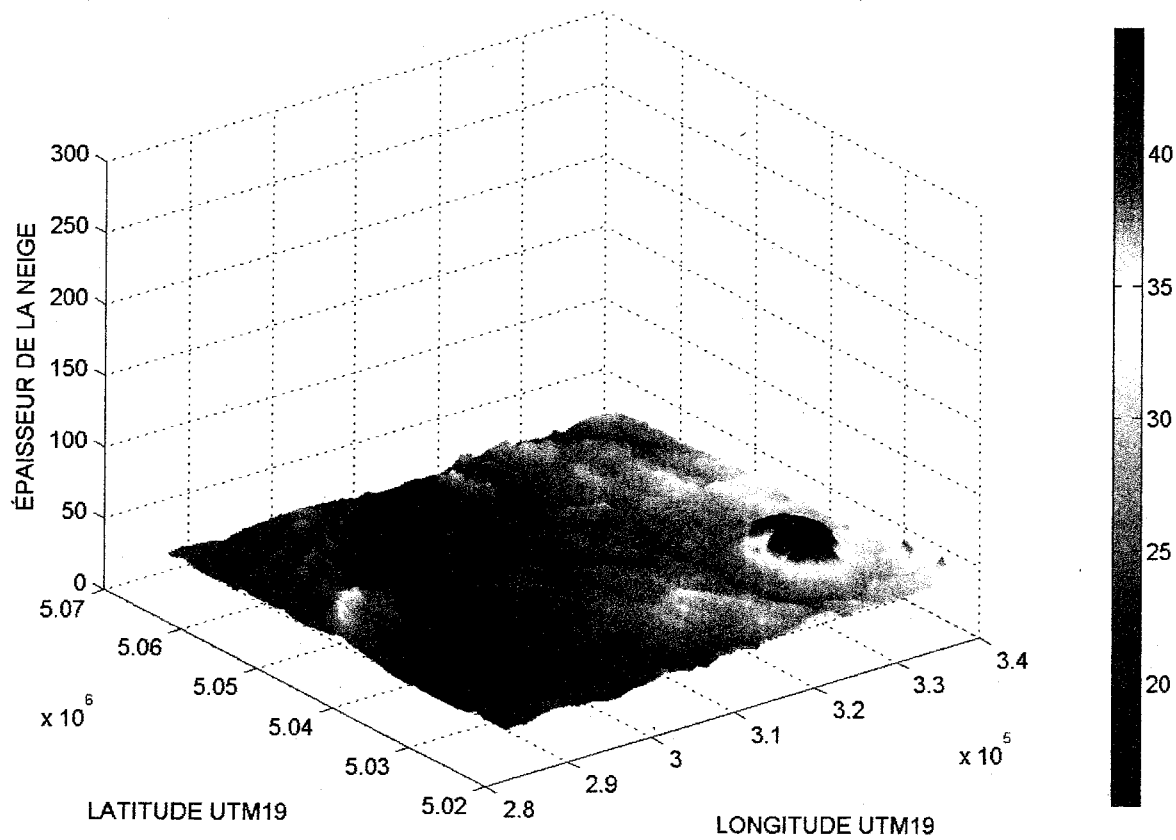
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 1 DECEMBRE 2007 (CM)



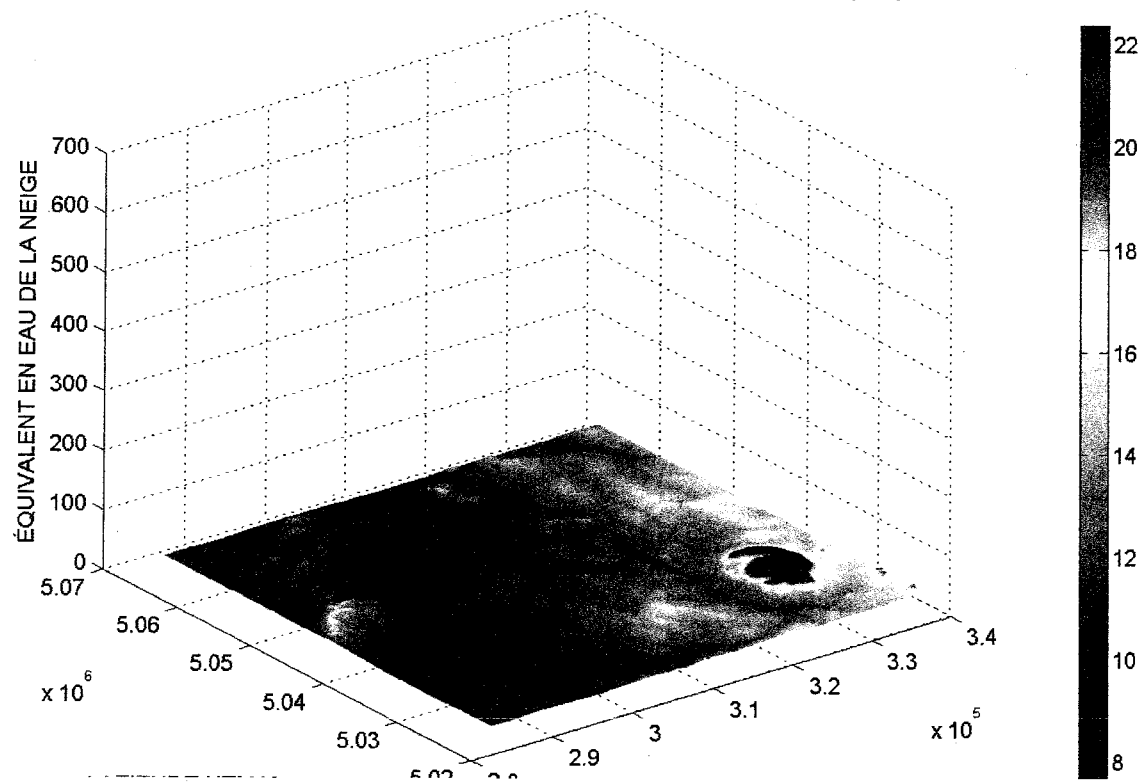
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 1 DECEMBRE 2007 (MM)



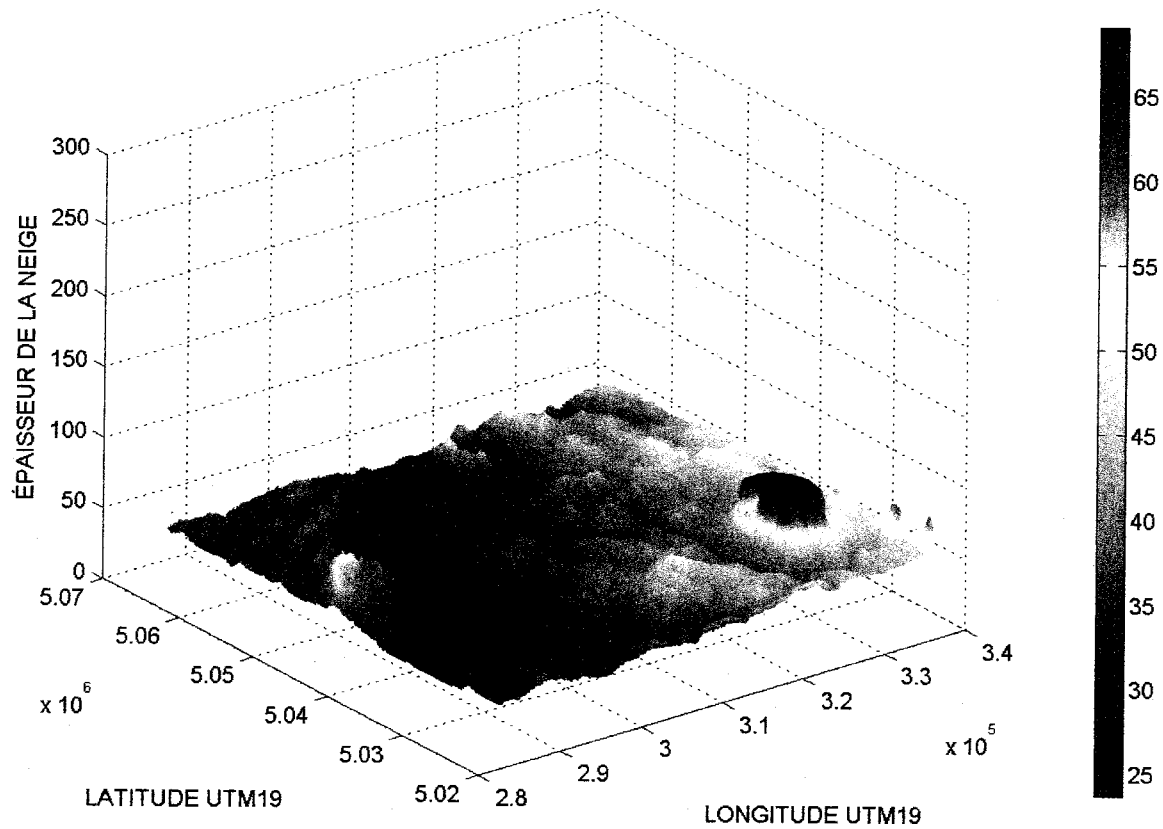
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 8 DECEMBRE 2007 (CM)



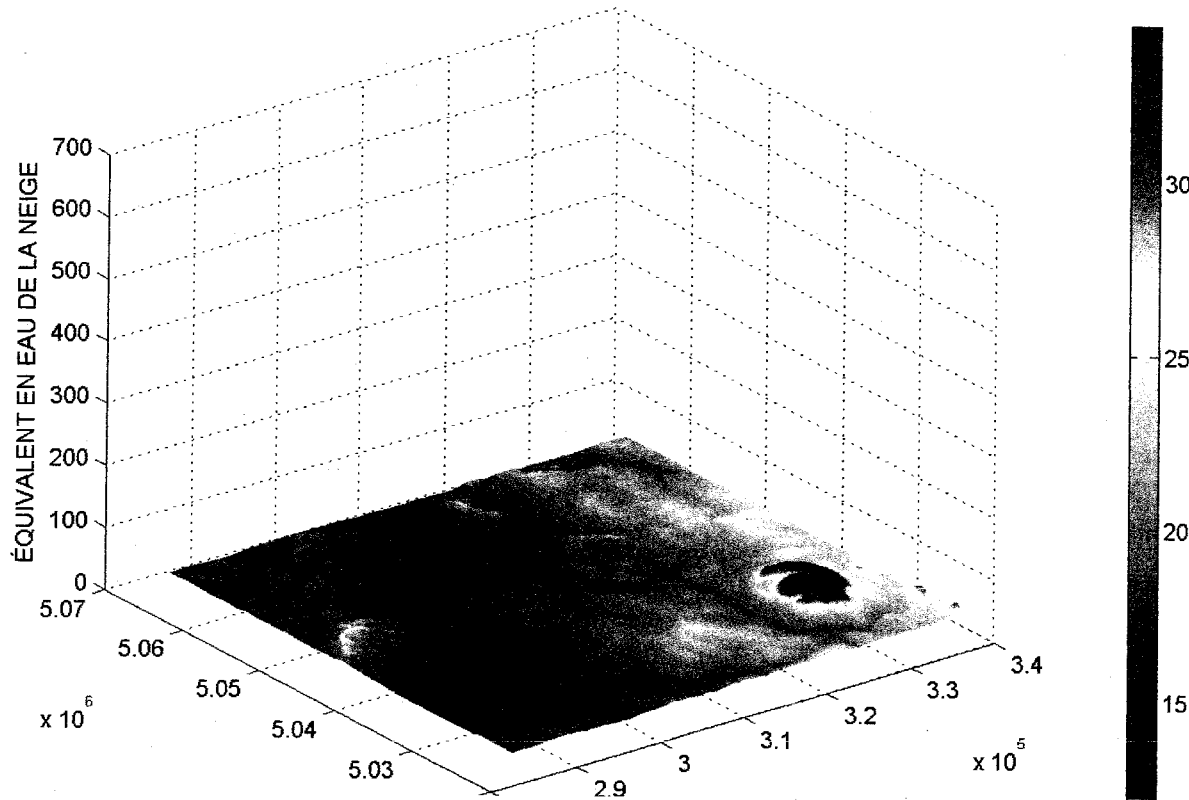
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 8 DECEMBRE 2007 (MM)



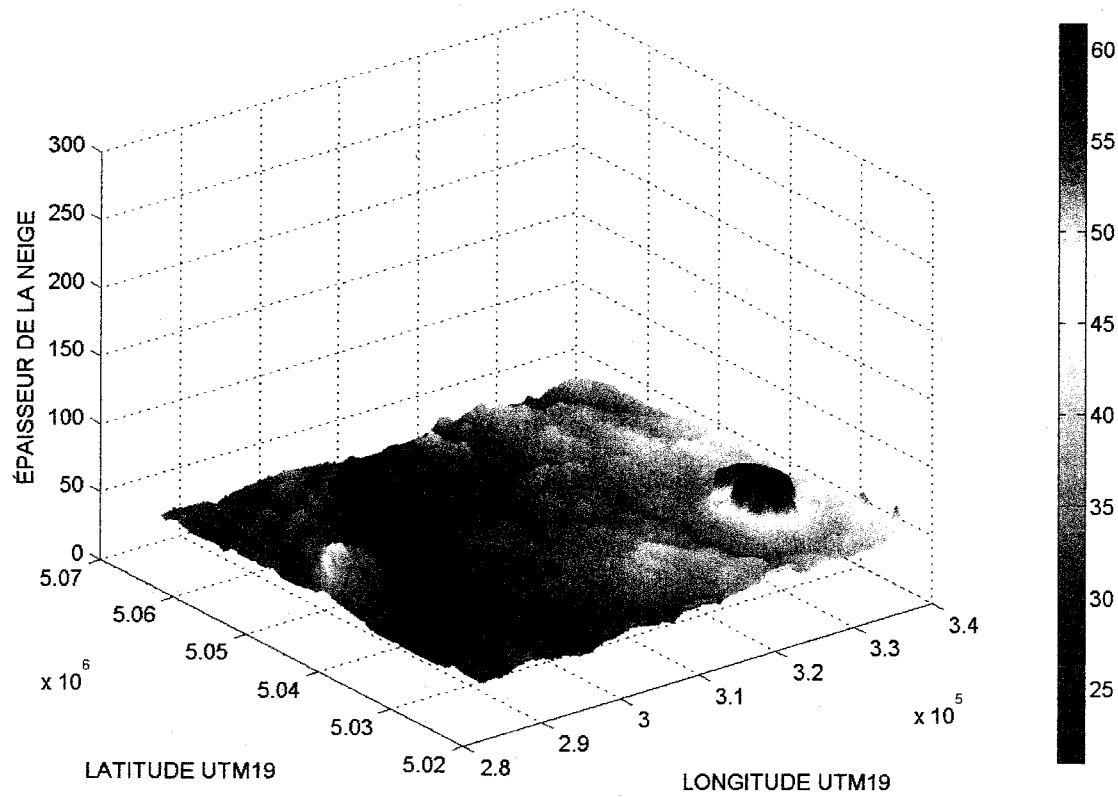
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 15 DECEMBRE 2007 (CM)



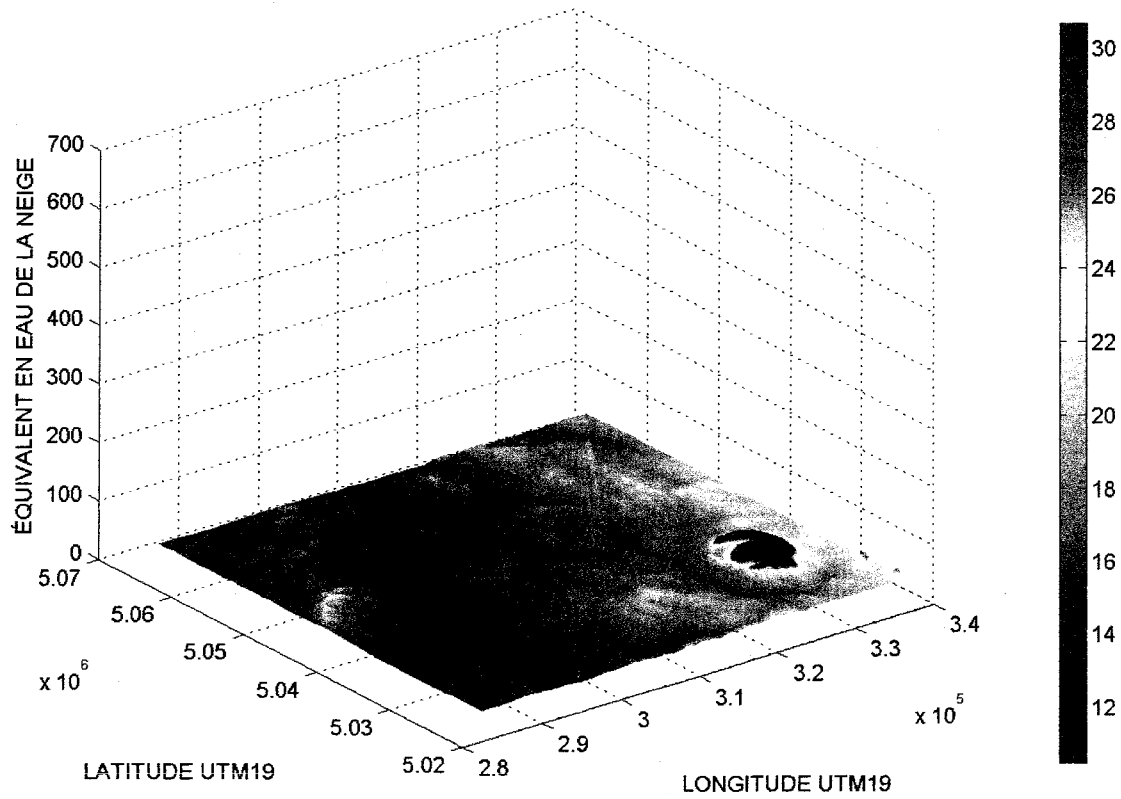
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 15 DECEMBRE 2007 (MM)



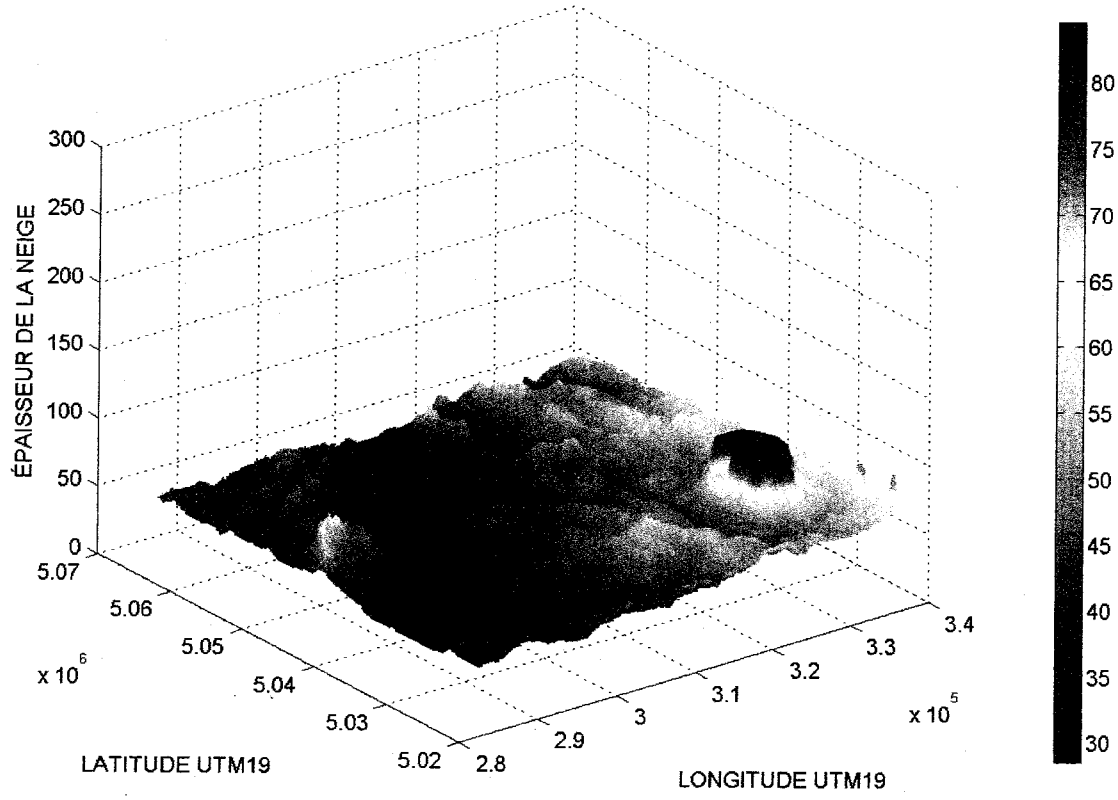
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 29 DECEMBRE 2007 (CM)



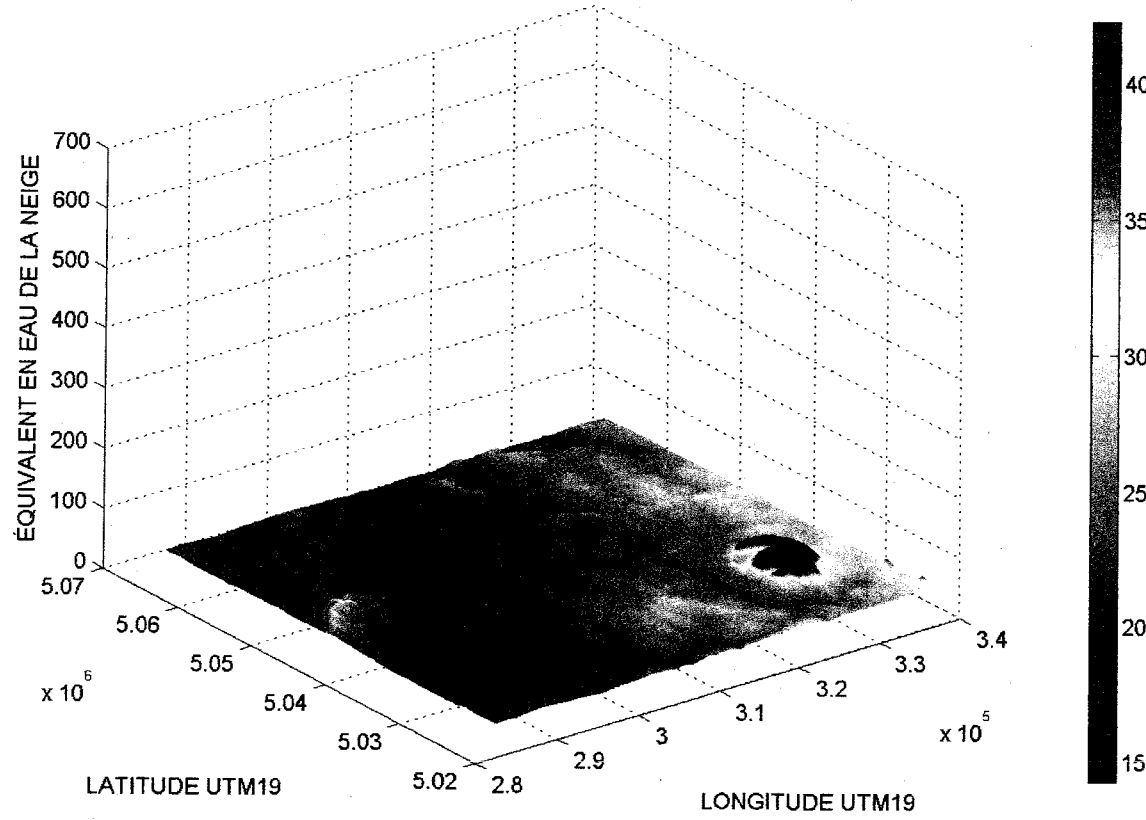
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 29 DECEMBRE 2007 (MM)



ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 5 JANVIER 2008 (CM)

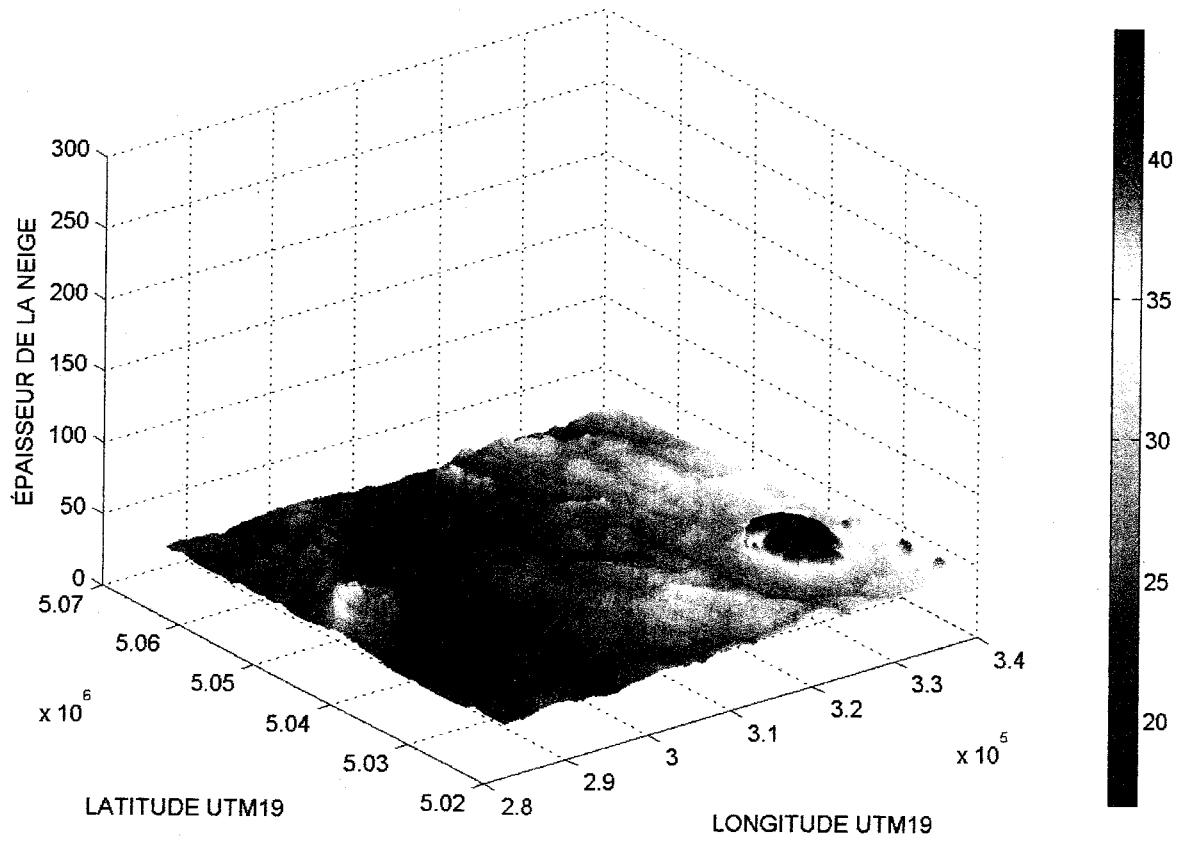


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 5 JANVIER 2008 (MM)

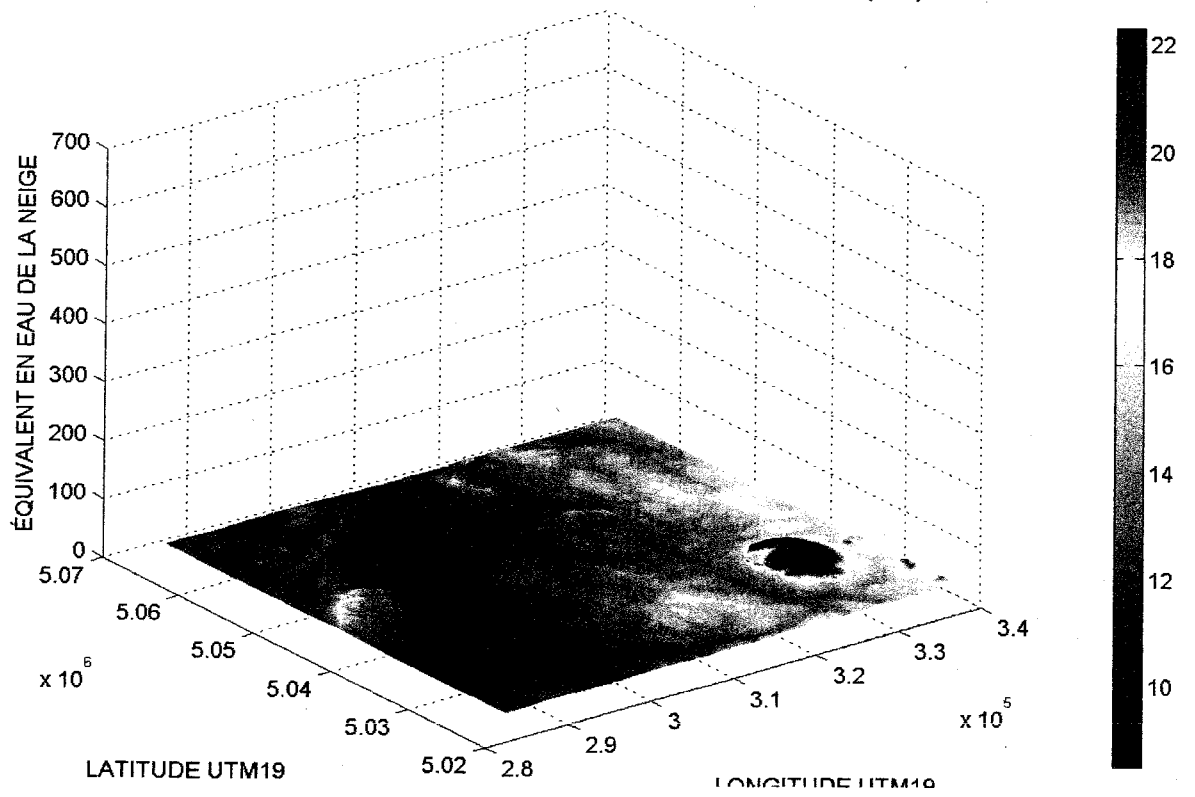




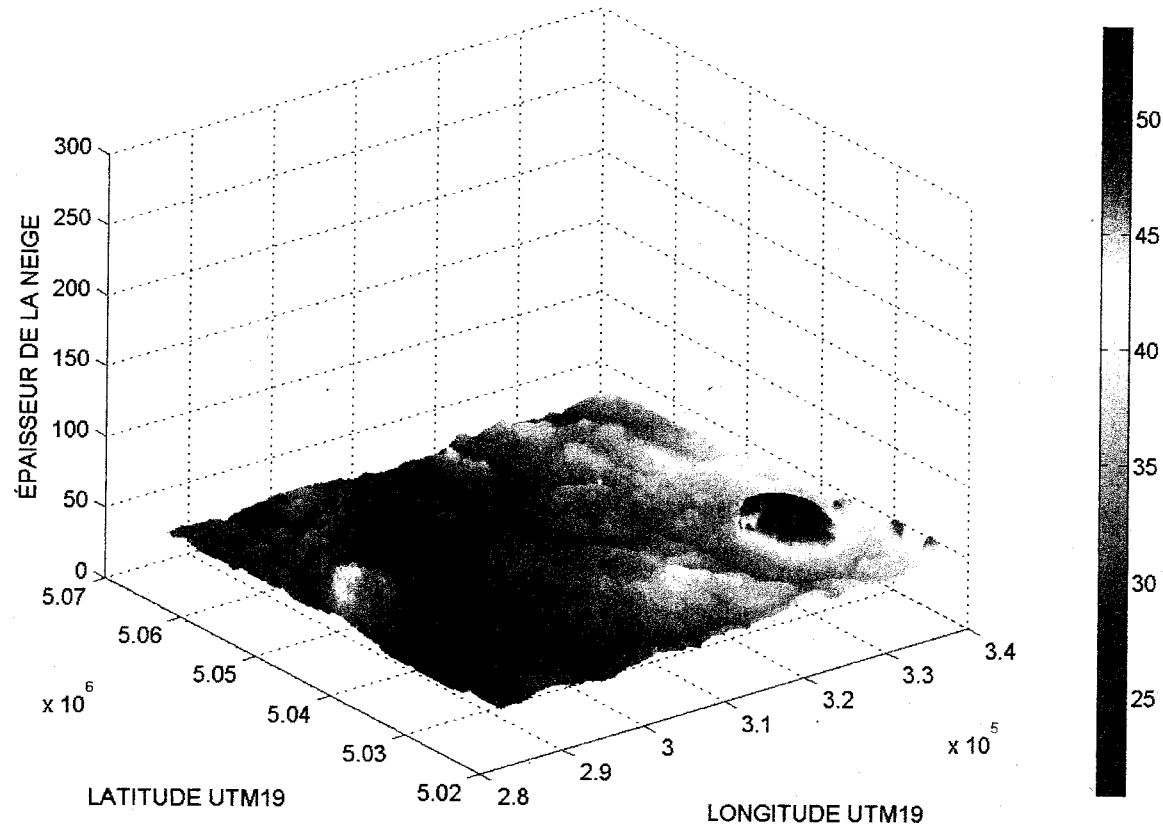
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 12 JANVIER 2008 (CM)



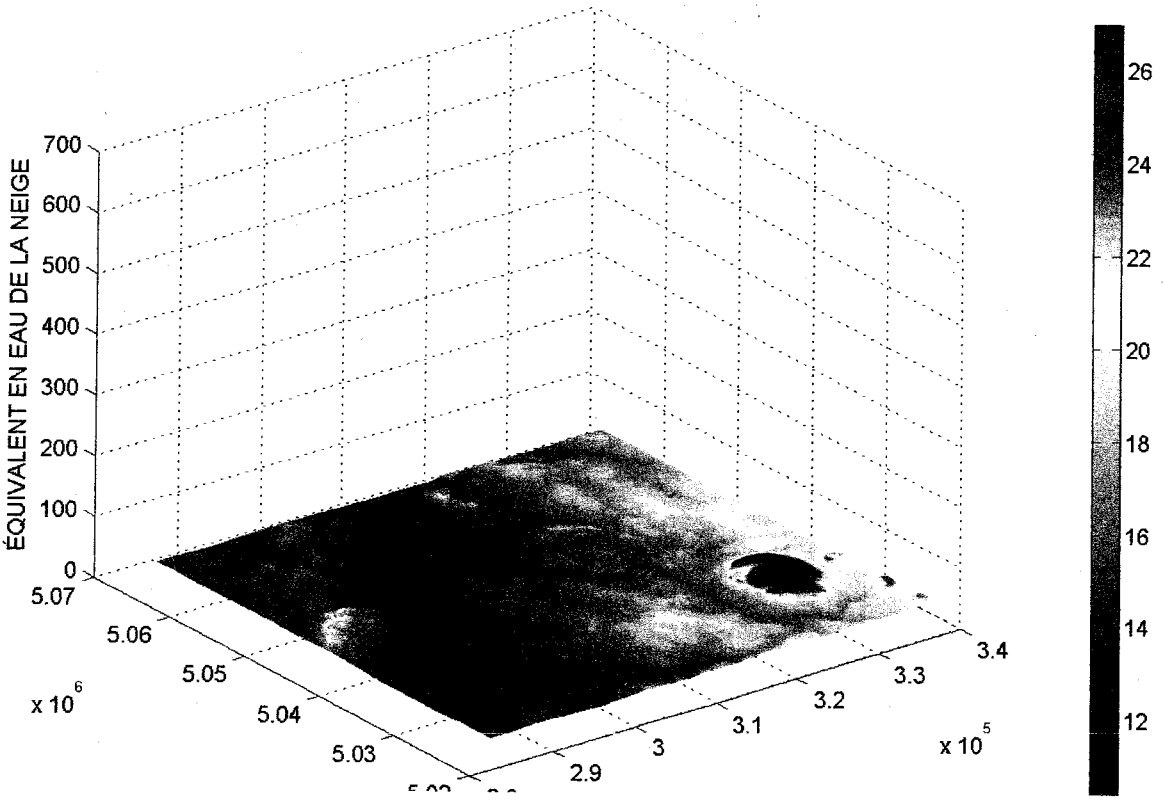
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 12 JANVIER 2008 (MM)



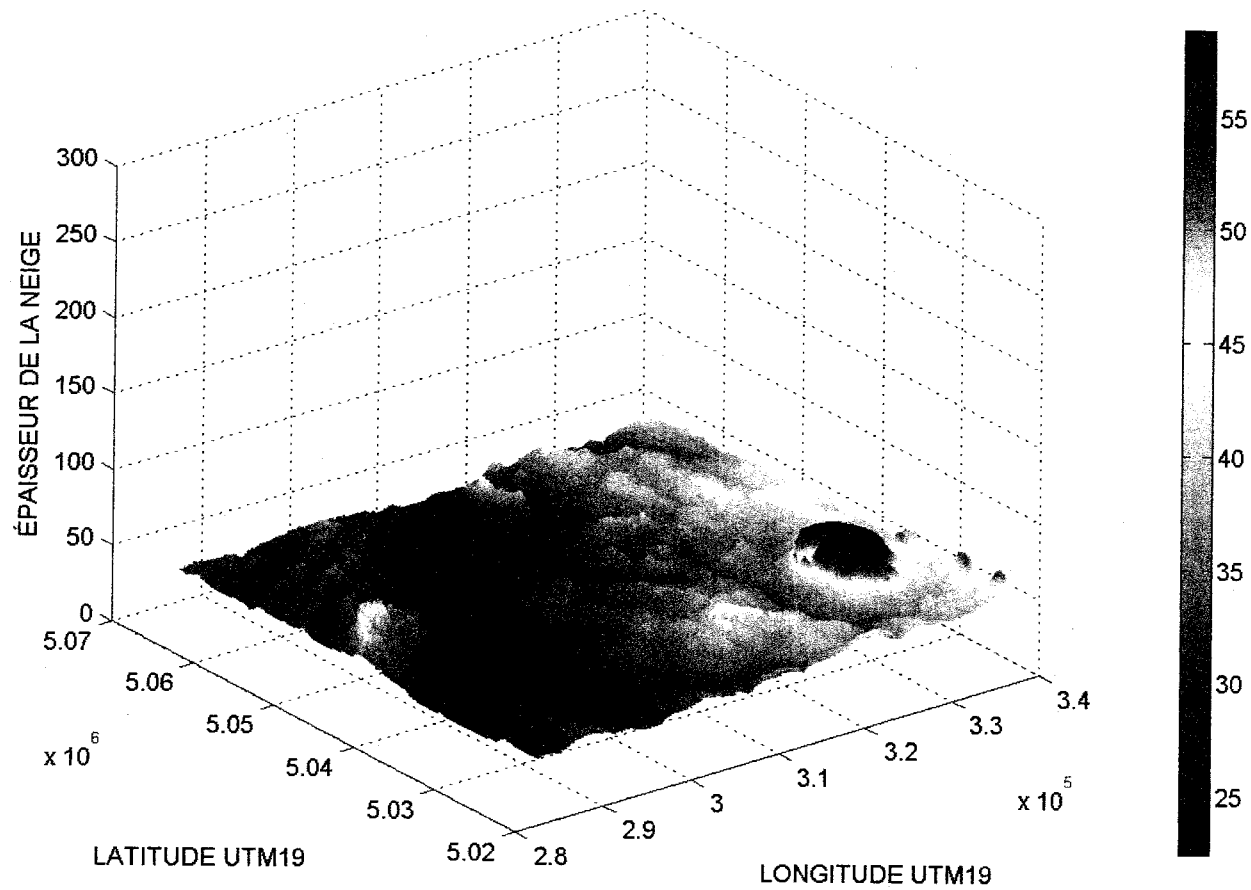
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 19 JANVIER 2008 (CM)



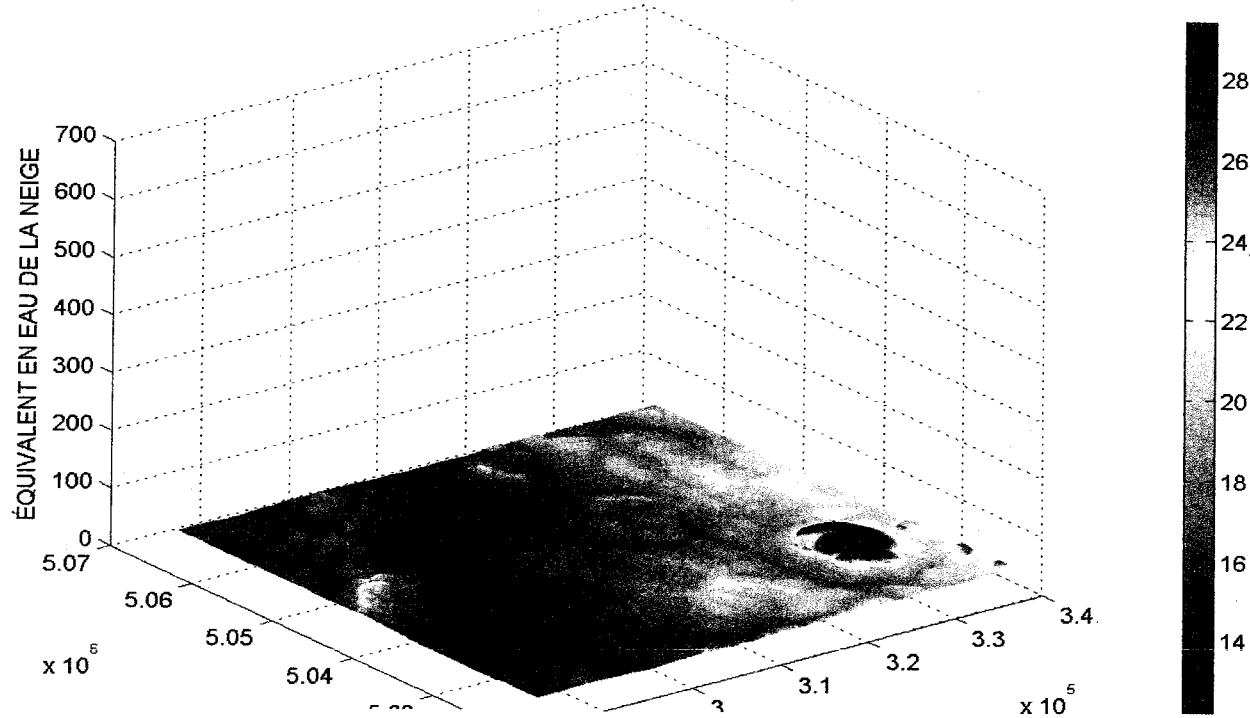
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 19 JANVIER 2008 (MM)



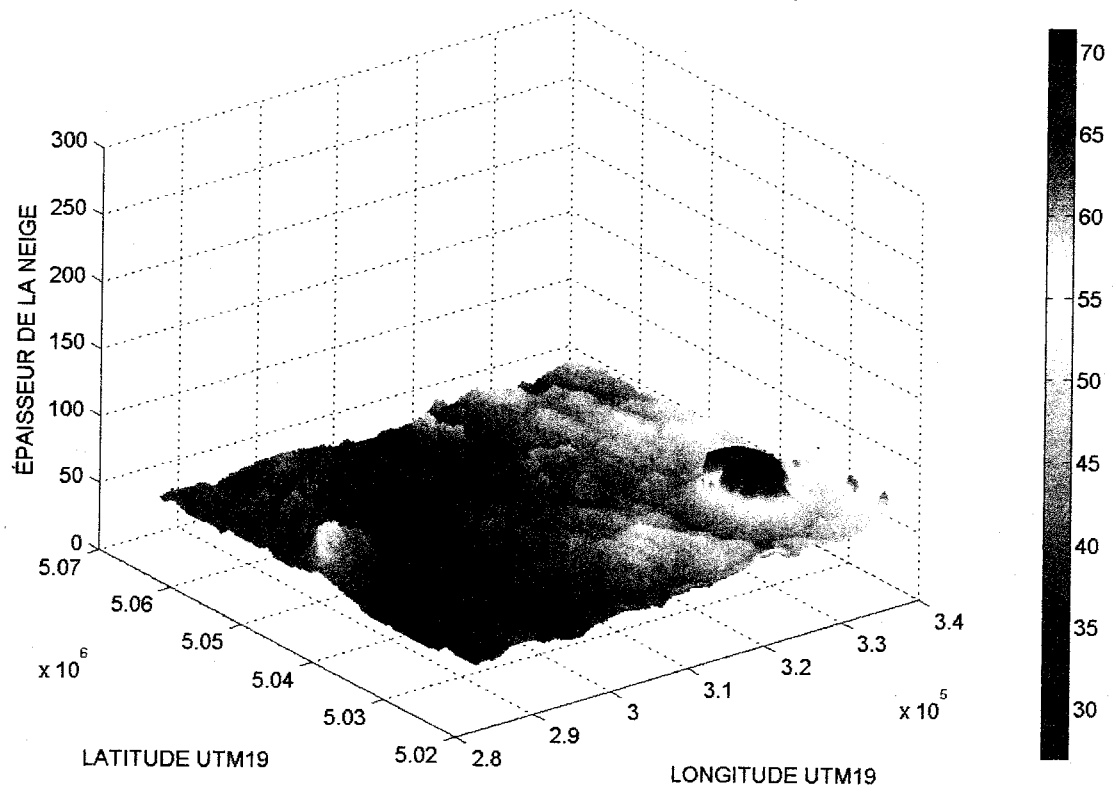
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 26 JANVIER 2008 (CM)



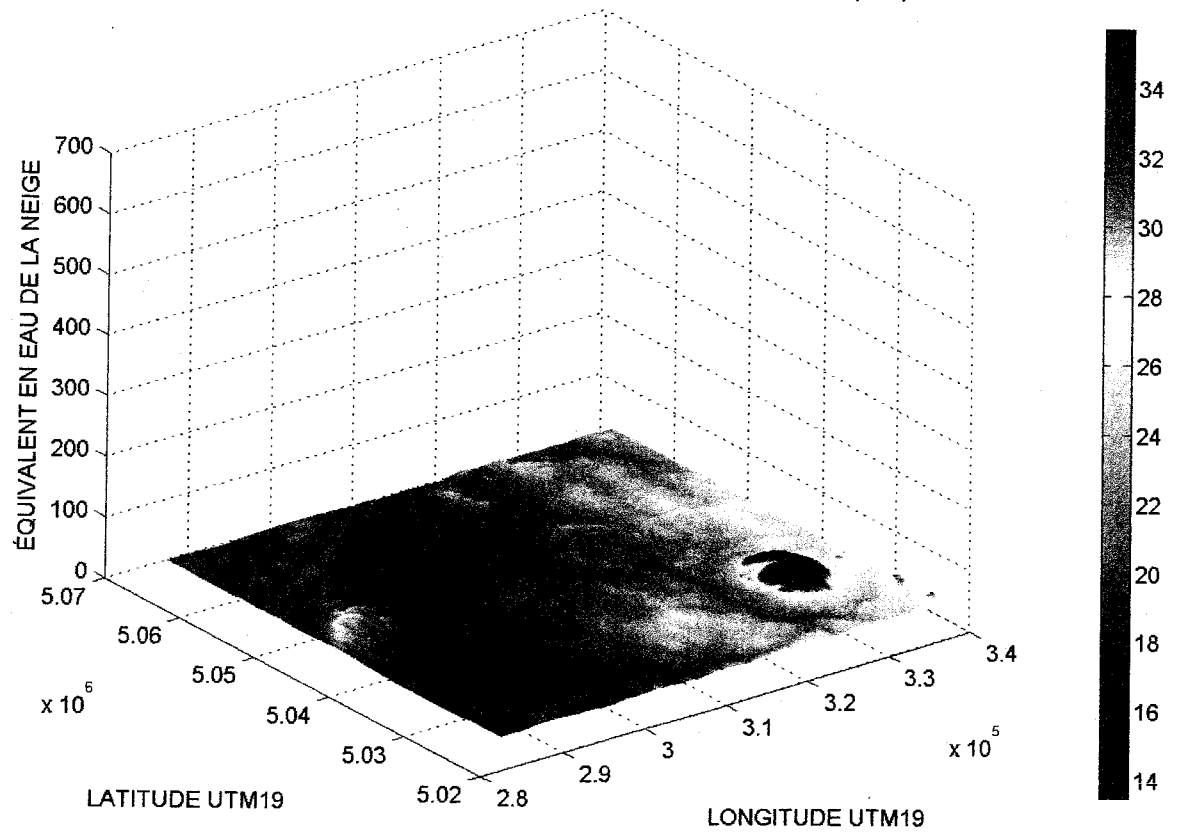
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 26 JANVIER 2008 (MM)



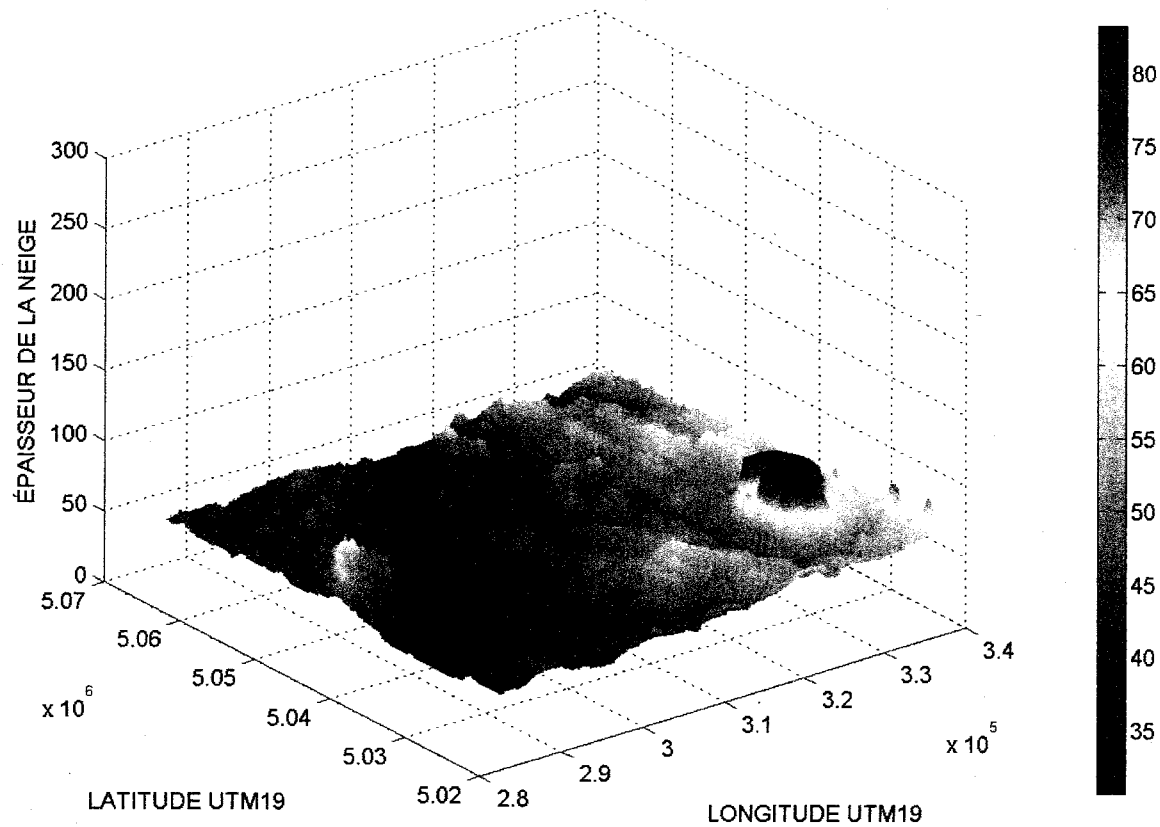
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 2 FEVRIER 2008 (CM)



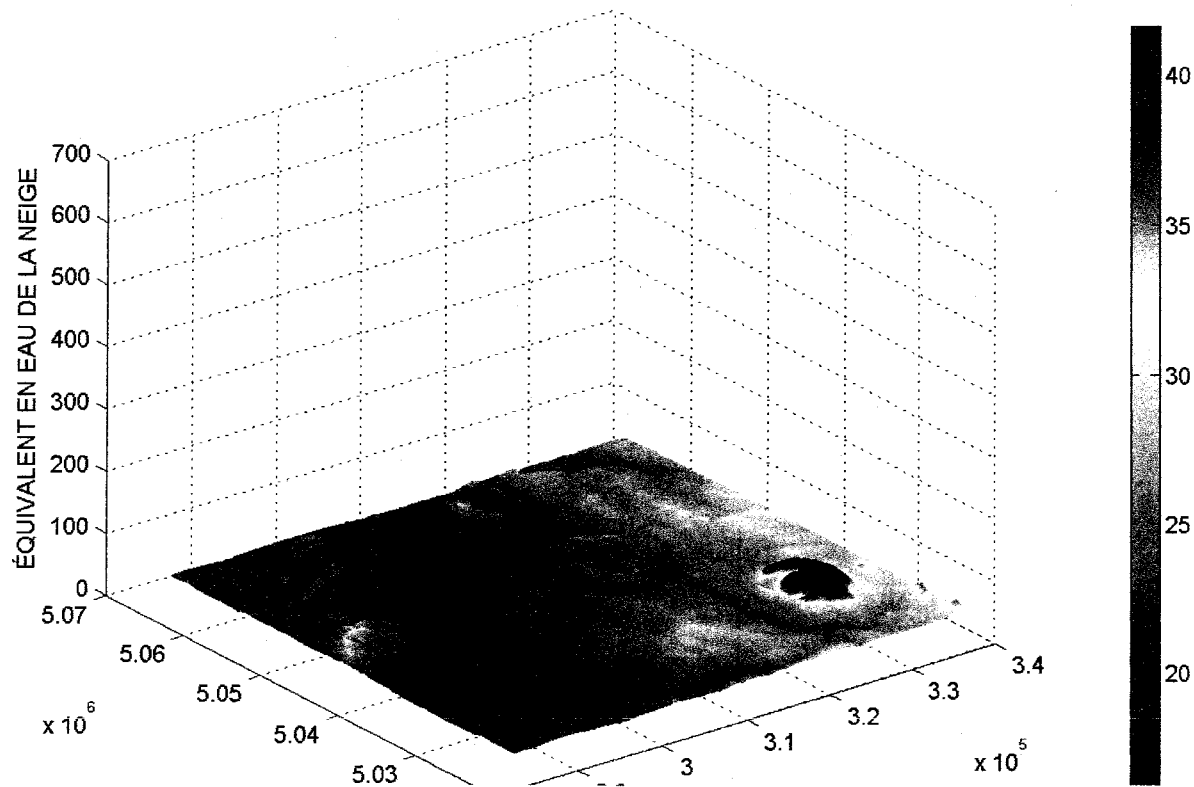
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 2 FEVRIER 2008 (MM)



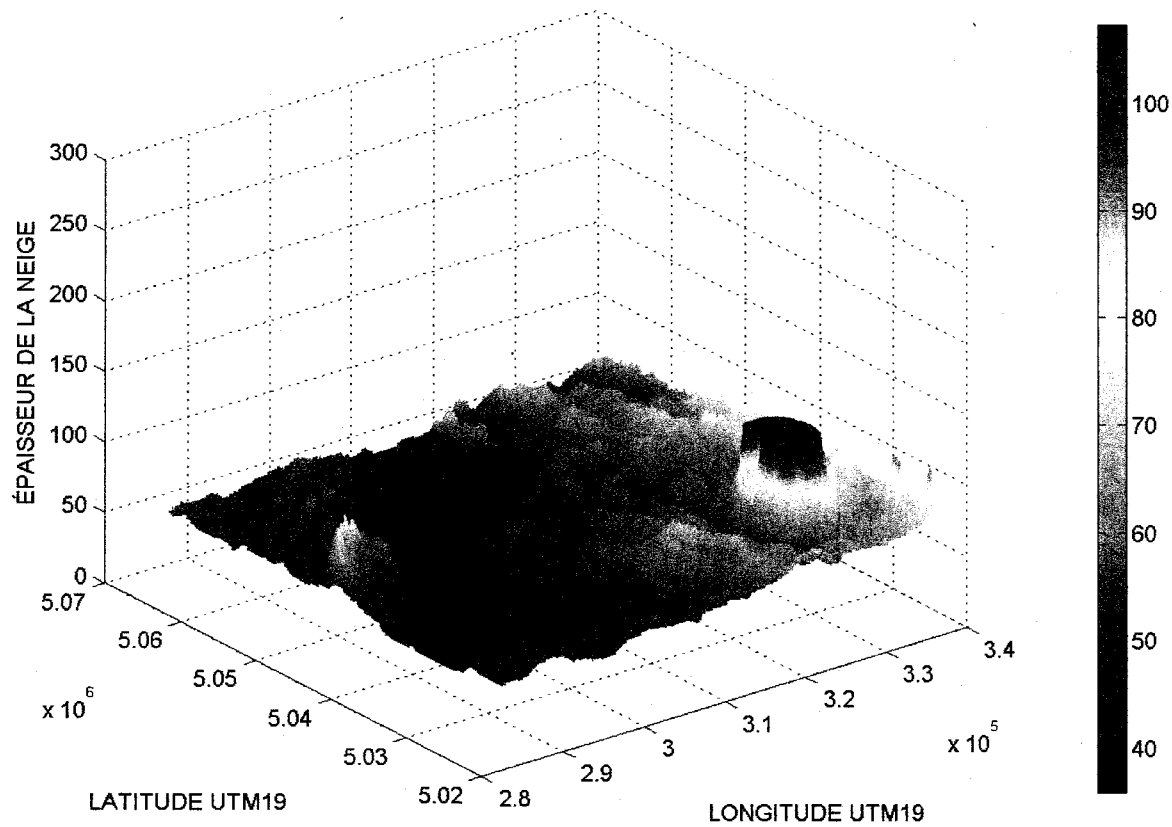
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 9 FEVRIER 2008 (CM)



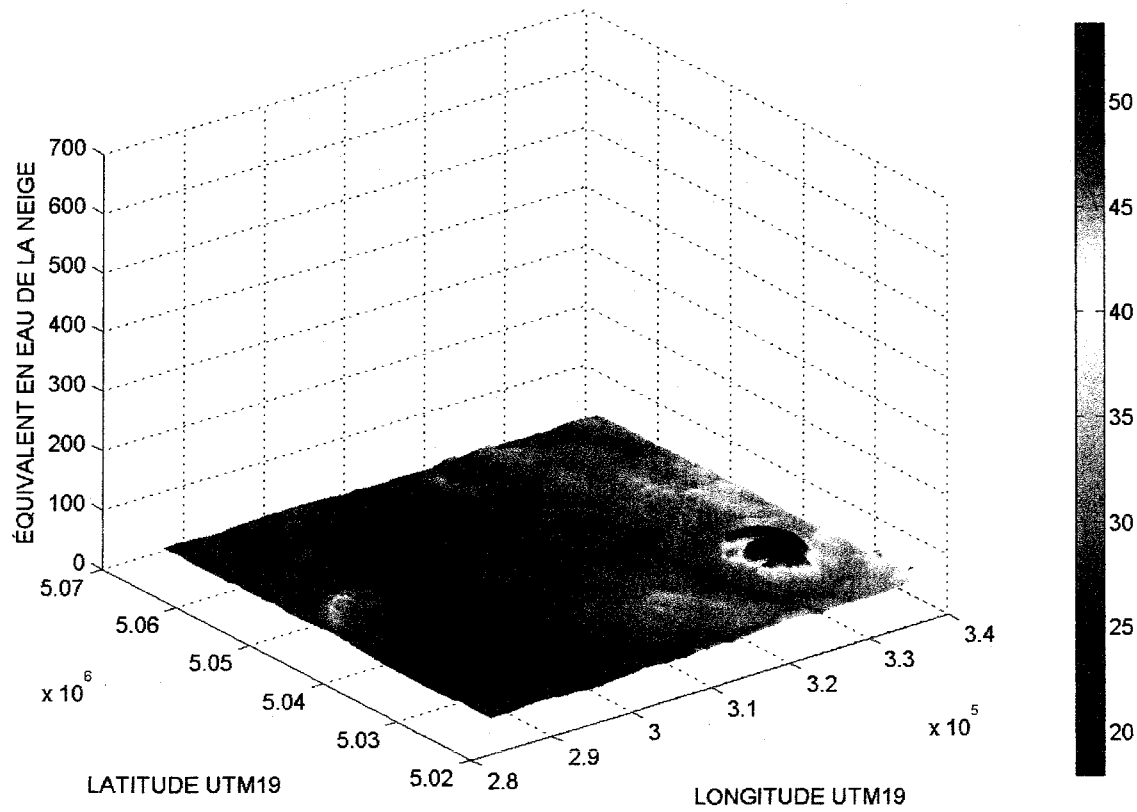
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 9 FEVRIER 2008 (MM)



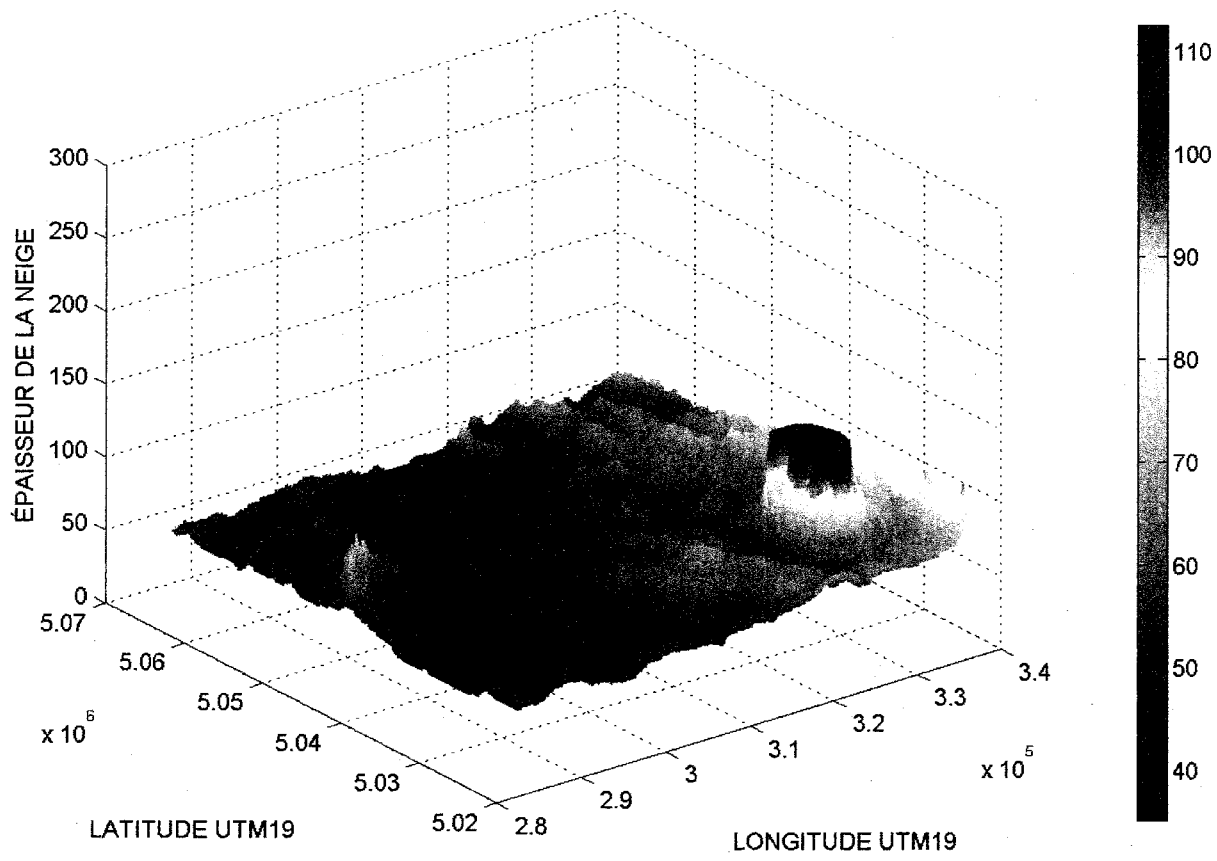
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 16 FEVRIER 2008 (CM)



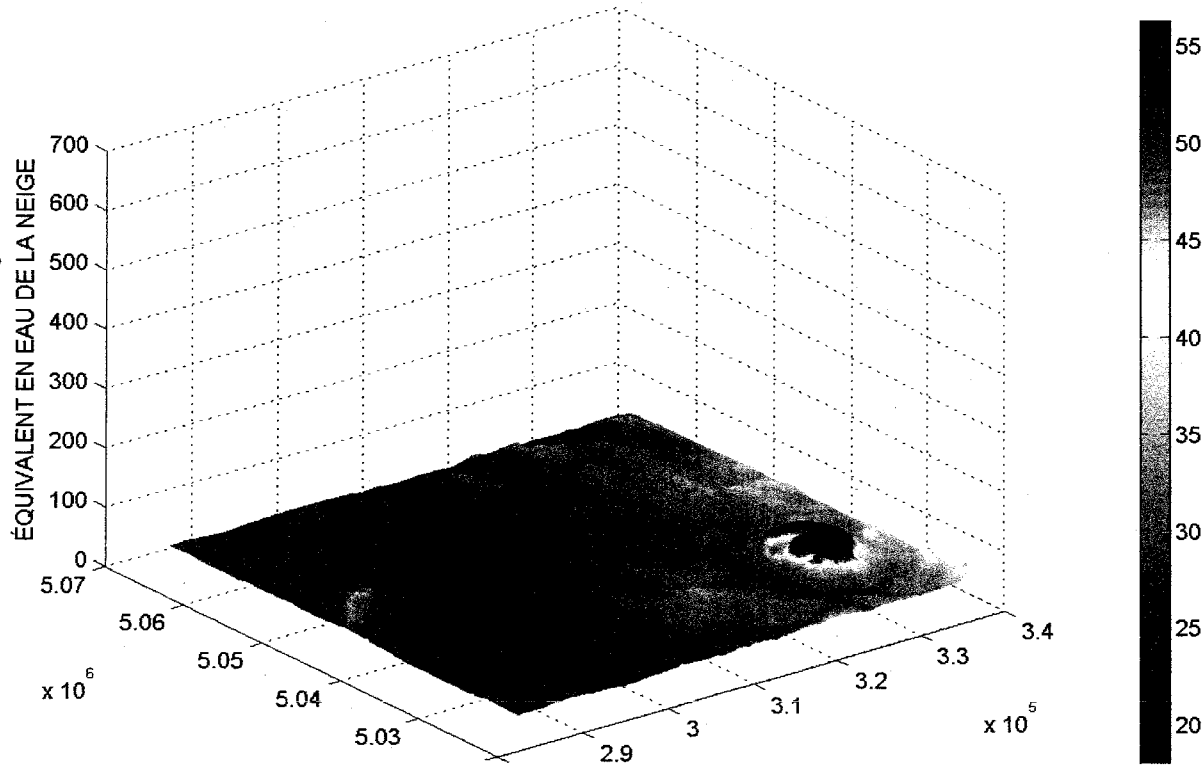
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 16 FEVRIER 2008 (MM)



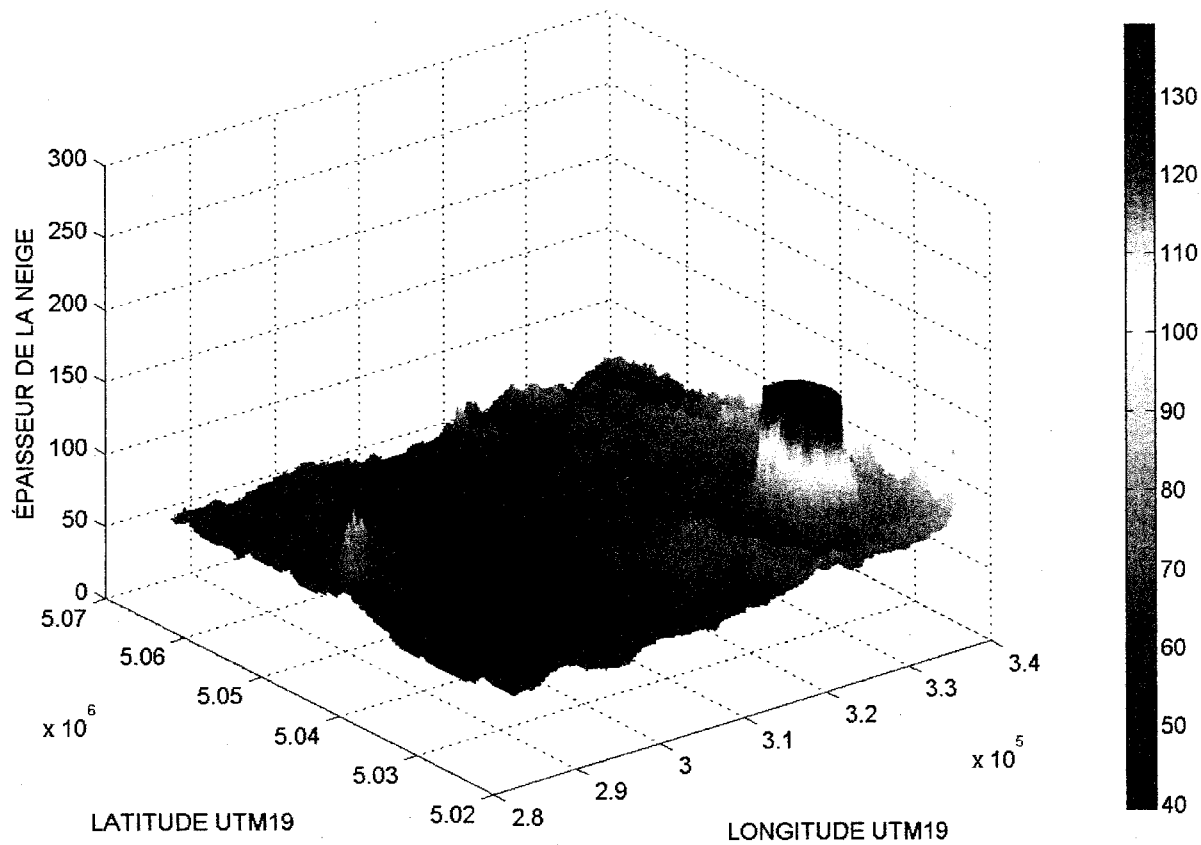
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 23 FEVRIER 2008 (CM)



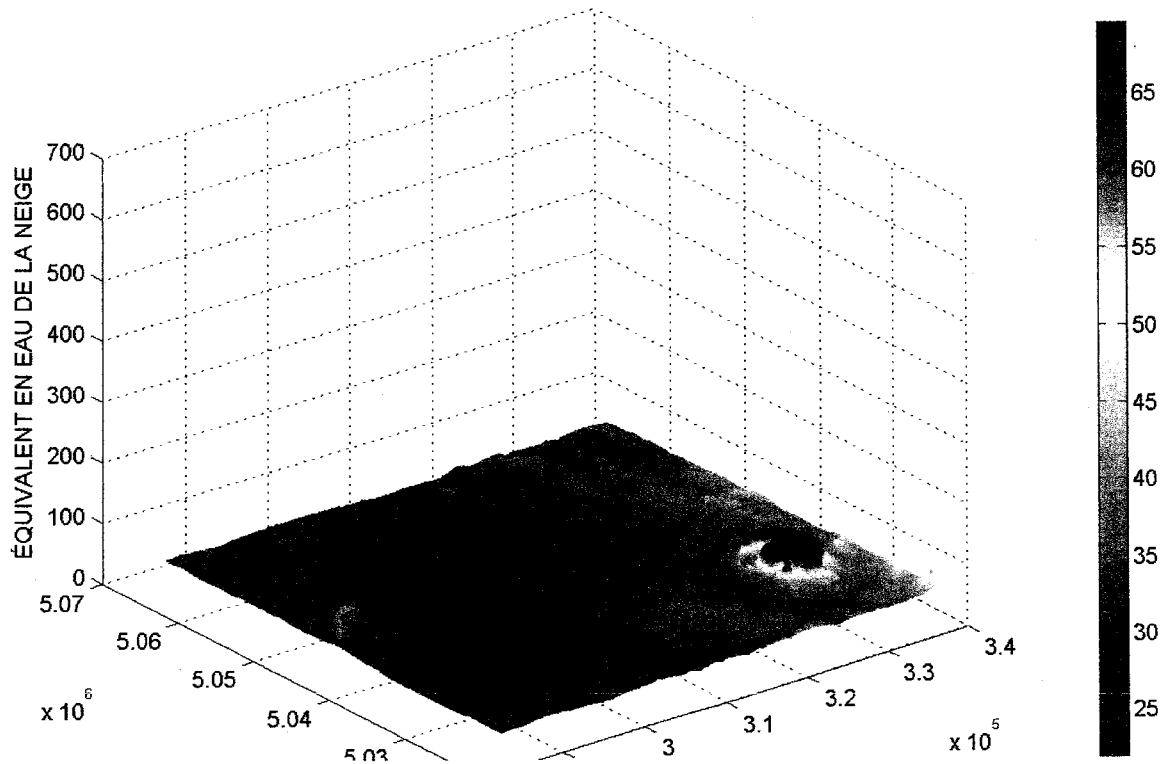
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 23 FEVRIER 2008 (MM)



ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 1 MARS 2008 (CM)

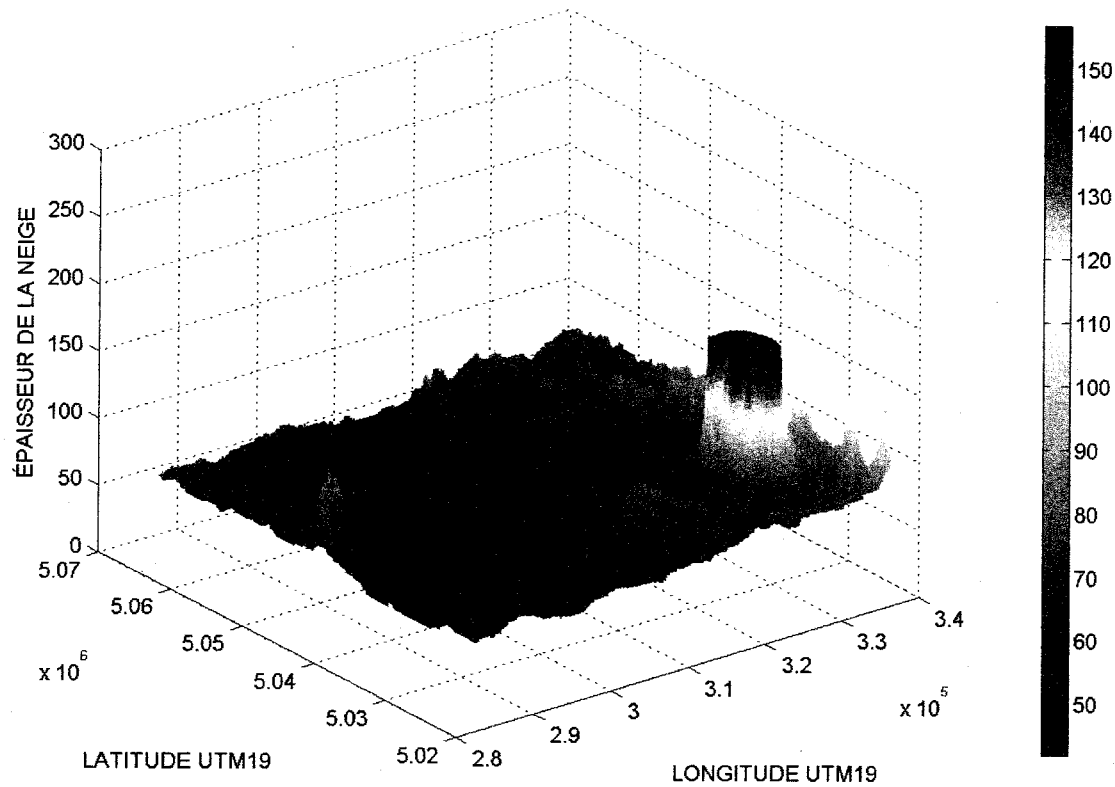


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 1 MARS 2008 (MM)

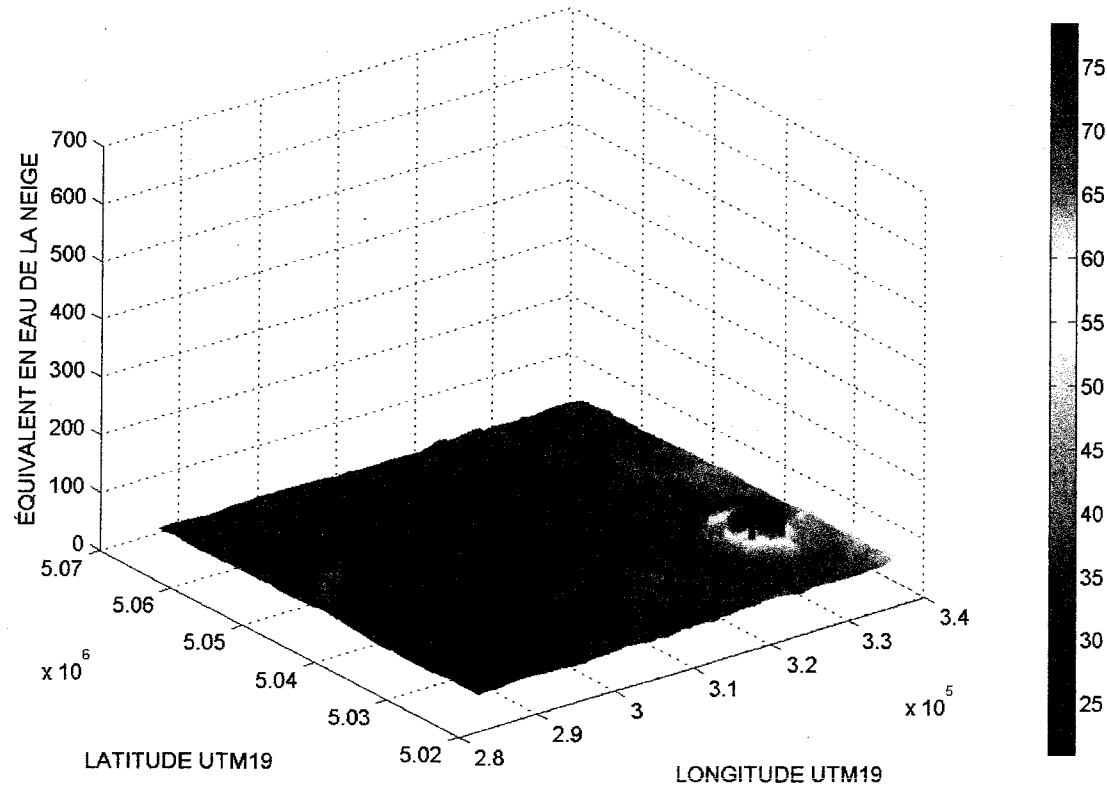




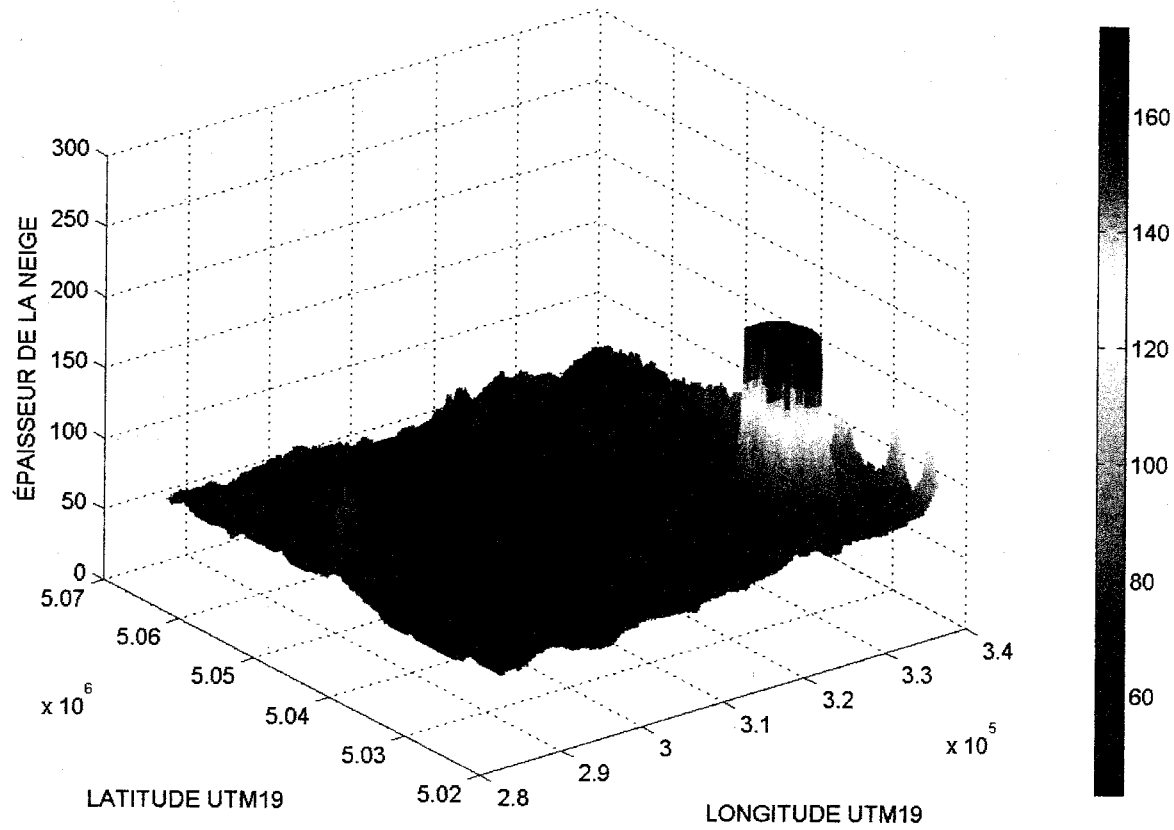
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 8 MARS 2008 (CM)



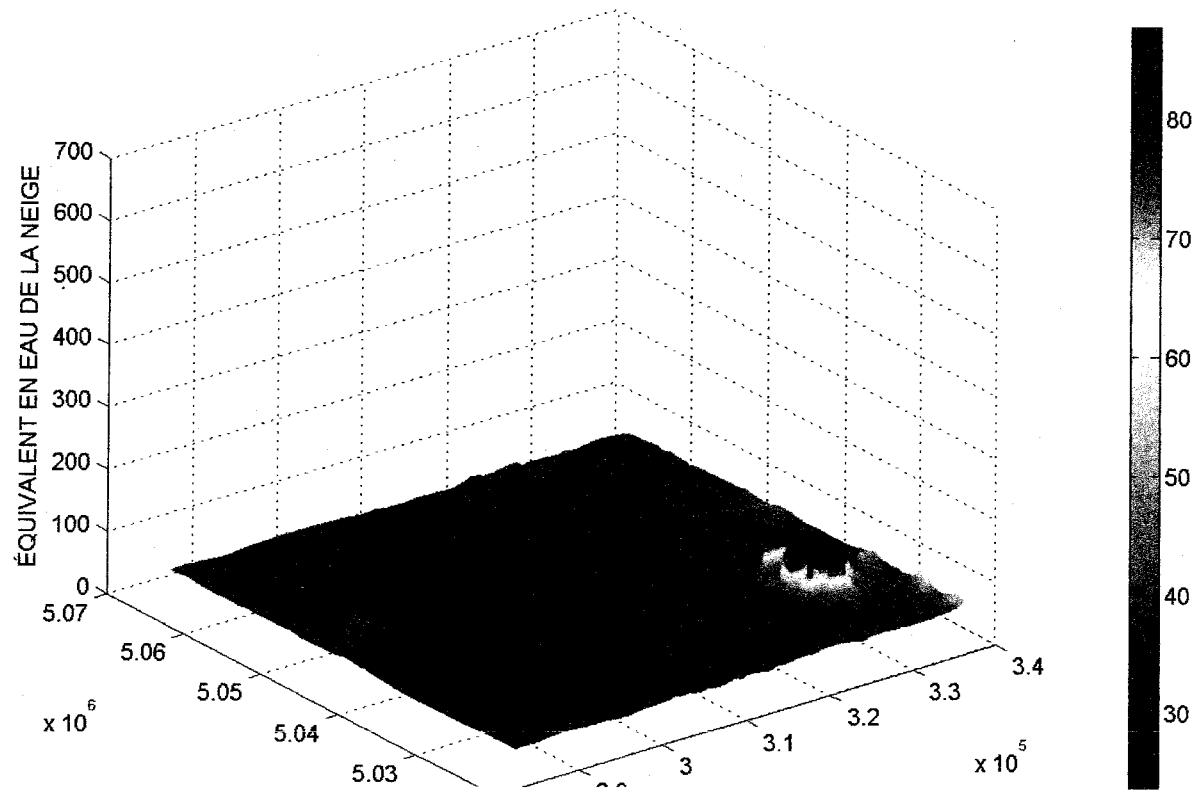
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 8 MARS 2008 (MM)



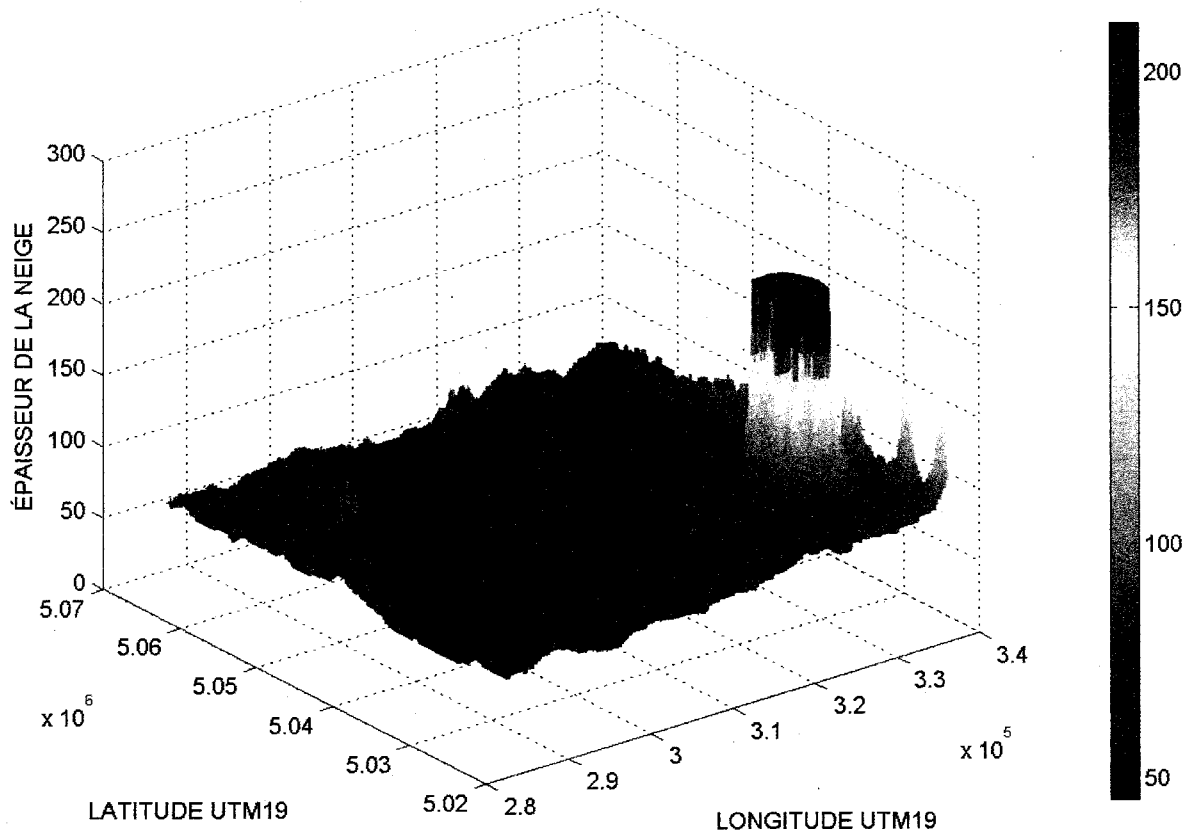
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 15 MARS 2008 (CM)



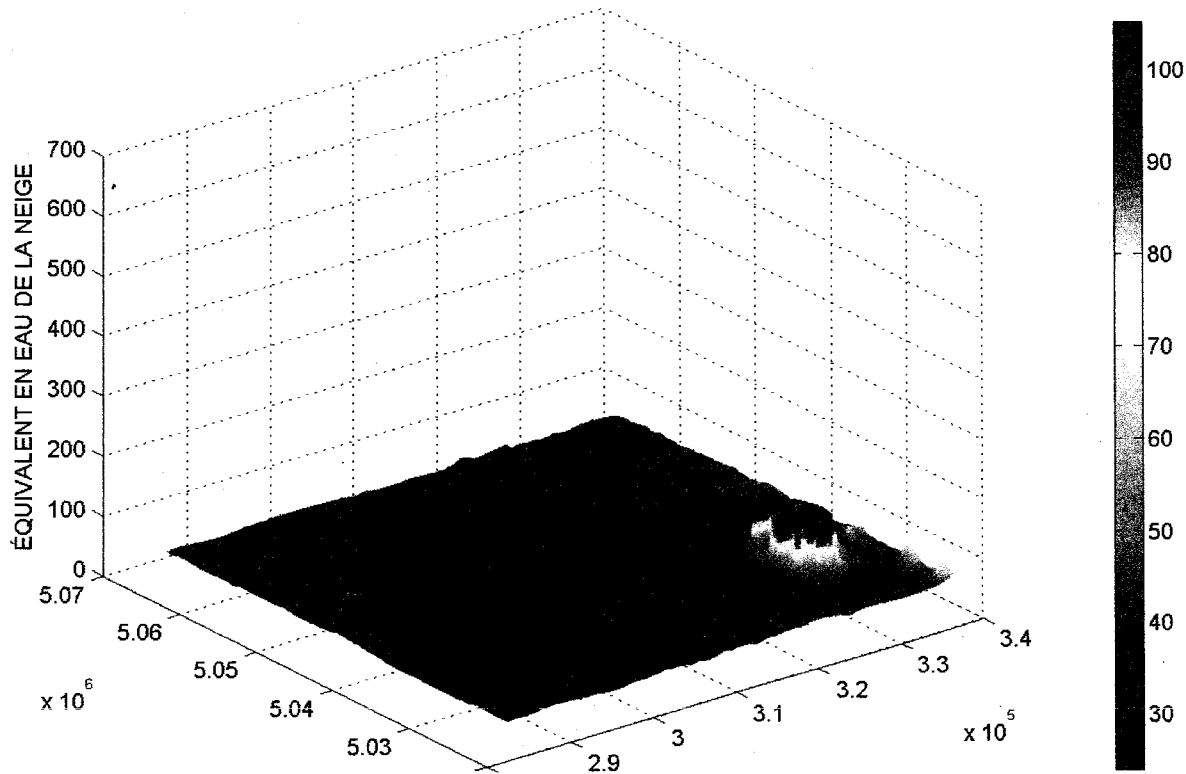
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 15 MARS 2008 (MM)



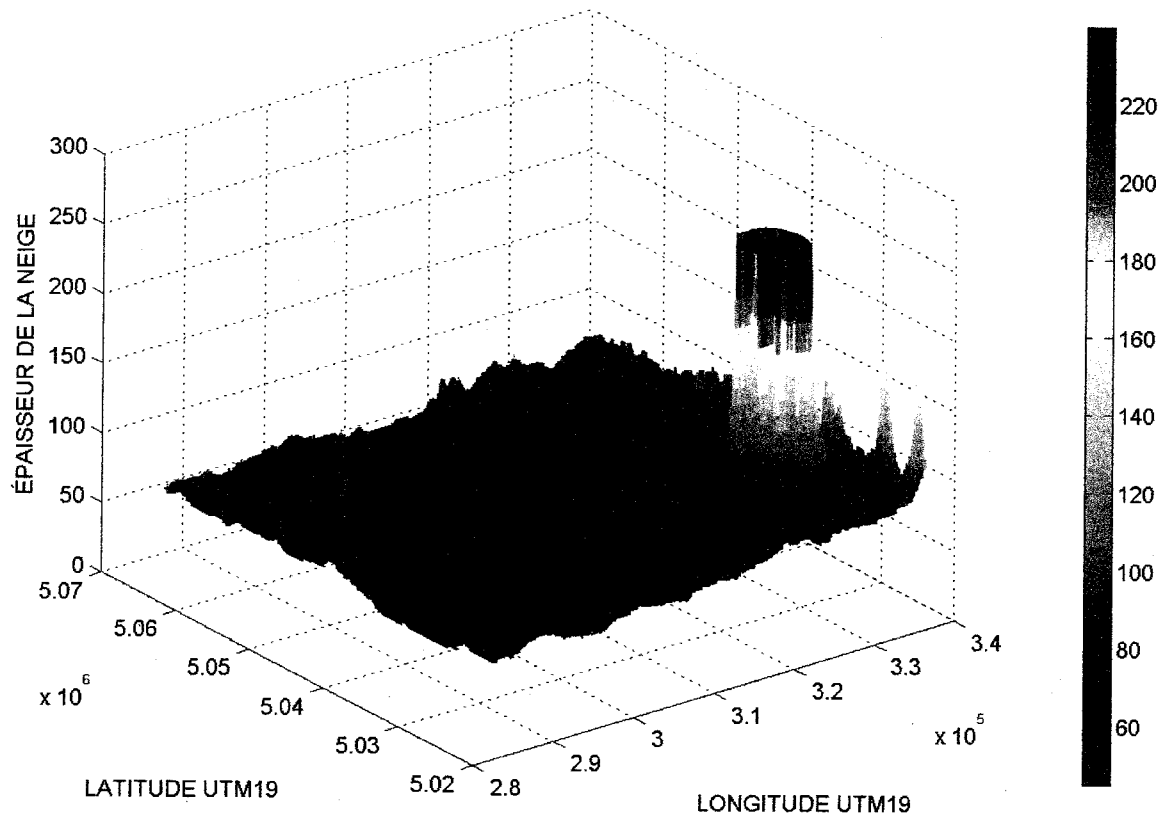
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 22 MARS 2008 (CM)



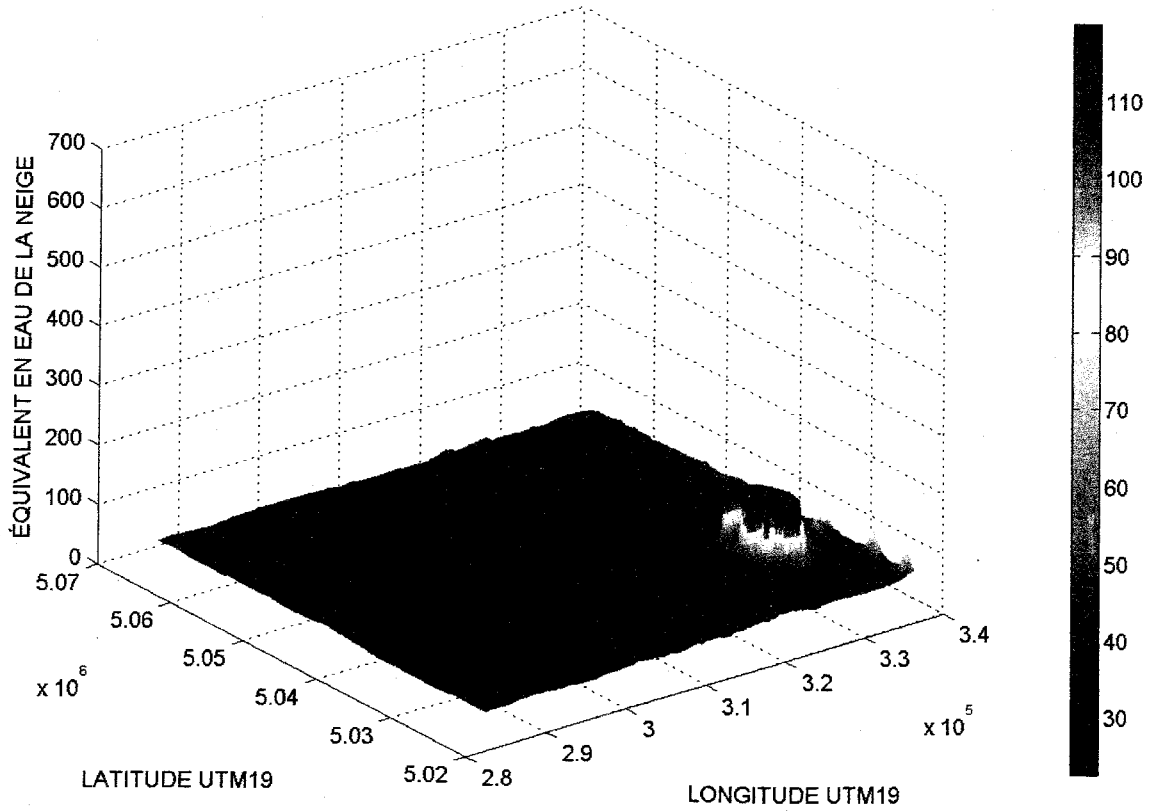
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 22 MARS 2008 (MM)



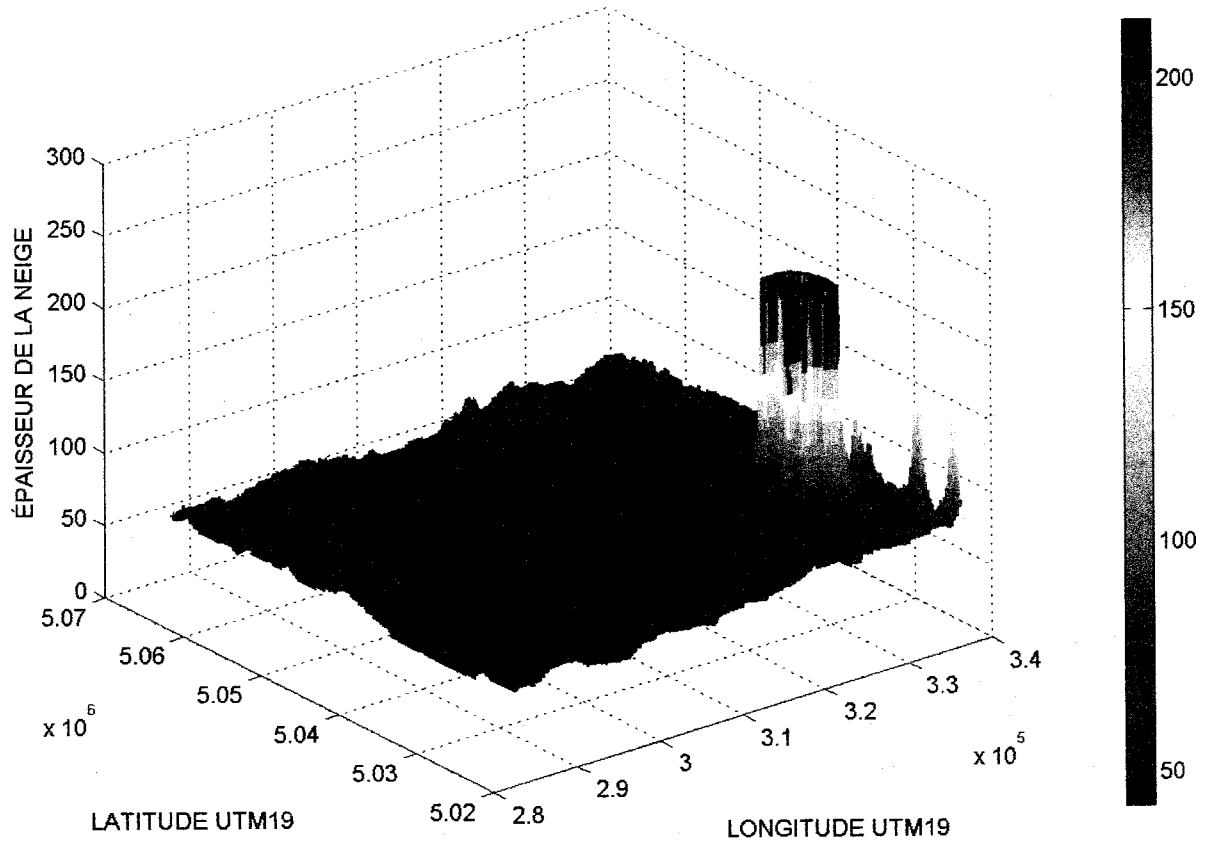
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 29 MARS 2008 (CM)



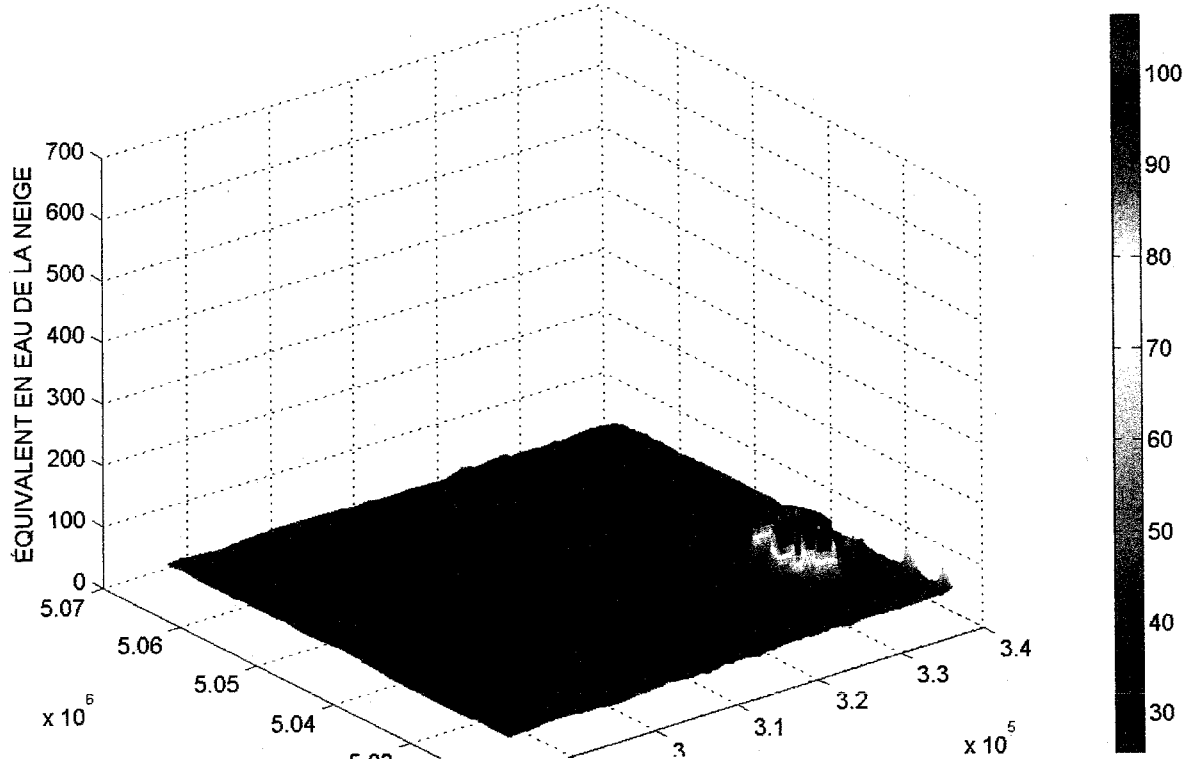
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 29 MARS 2008 (MM)



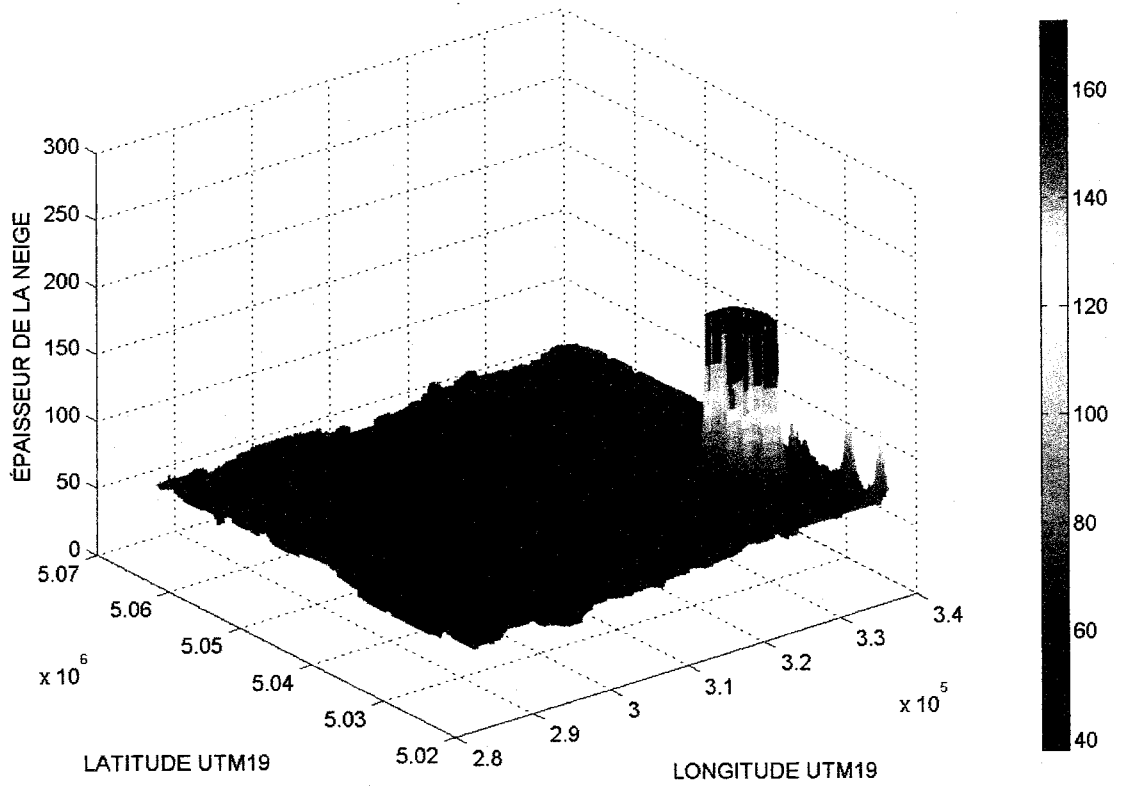
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 5 AVRIL 2008 (CM)



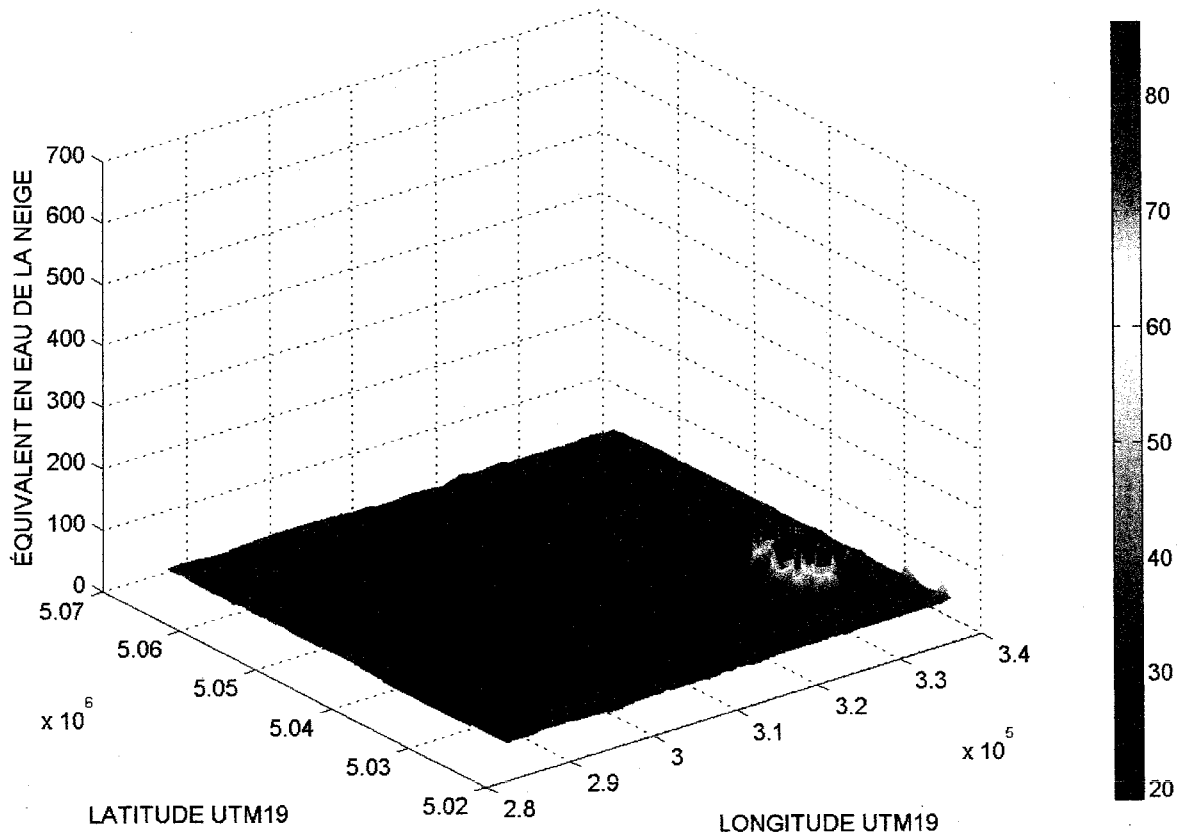
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 5 AVRIL 2008 (MM)



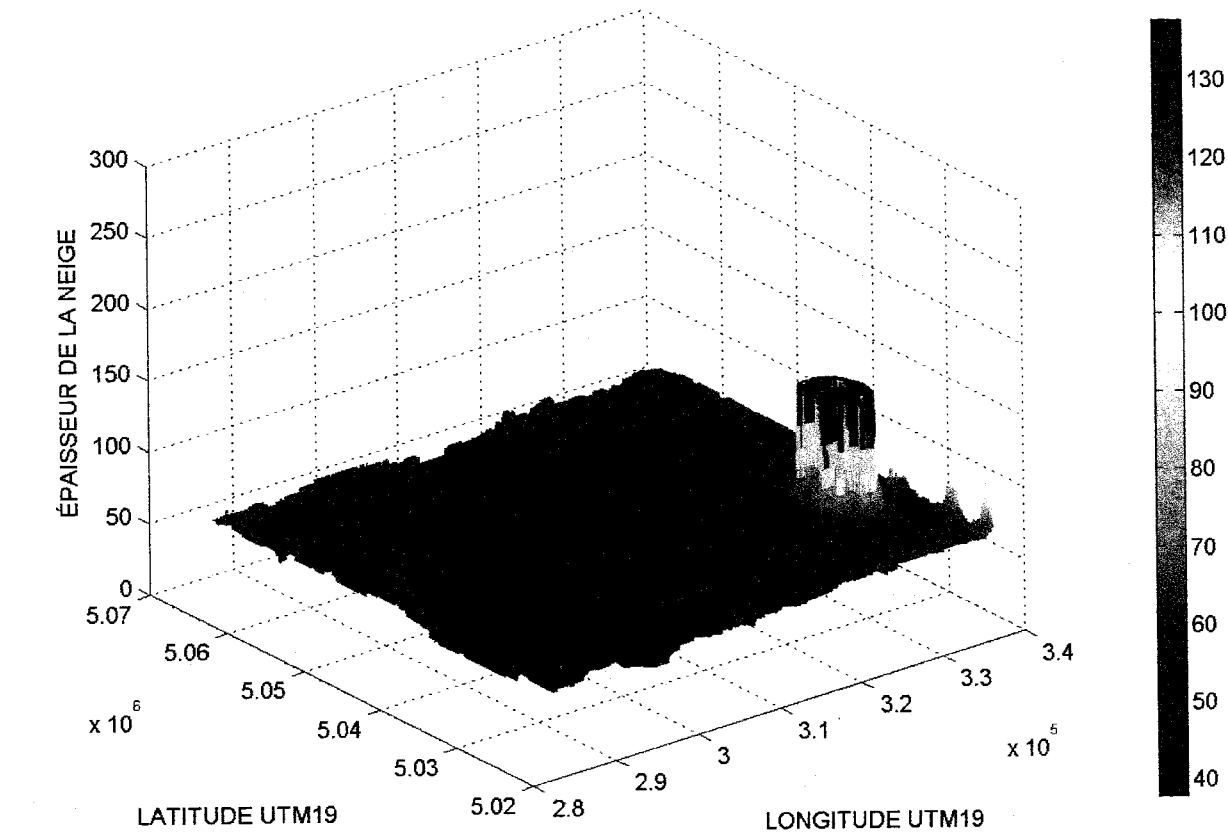
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 12 AVRIL 2008 (CM)



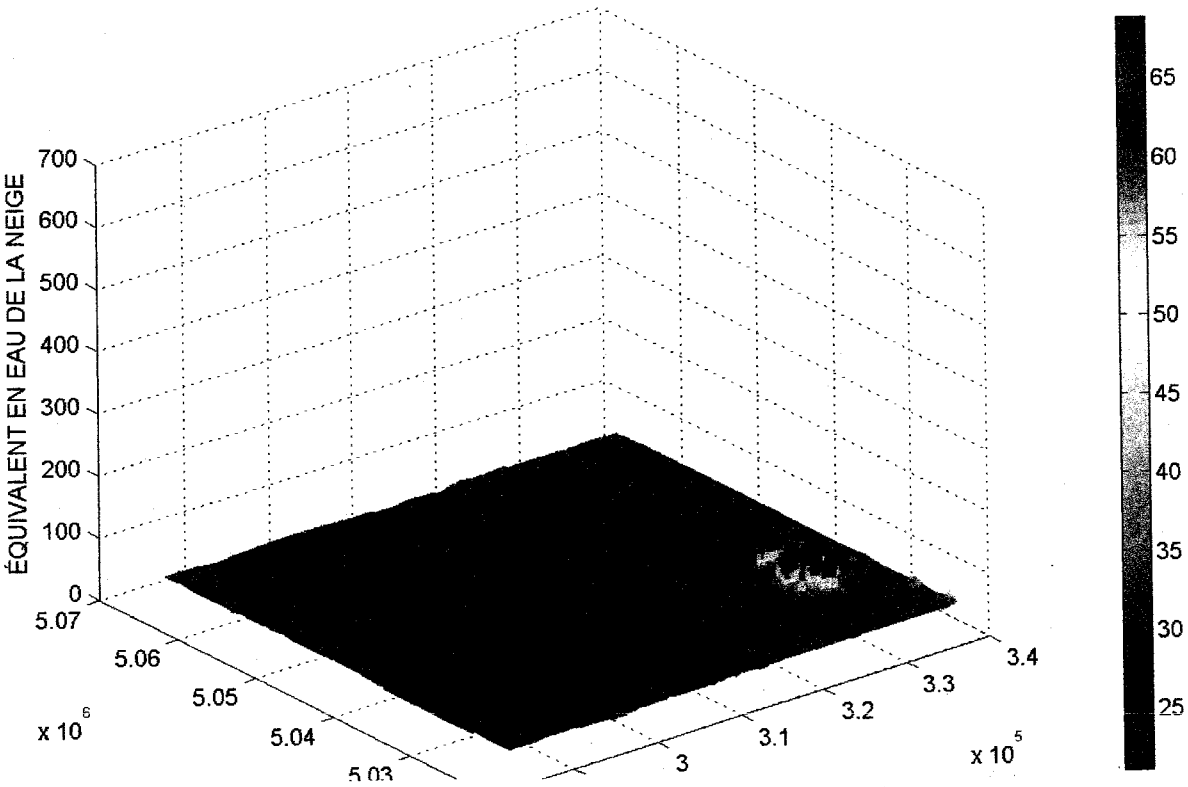
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 12 AVRIL 2008 (MM)



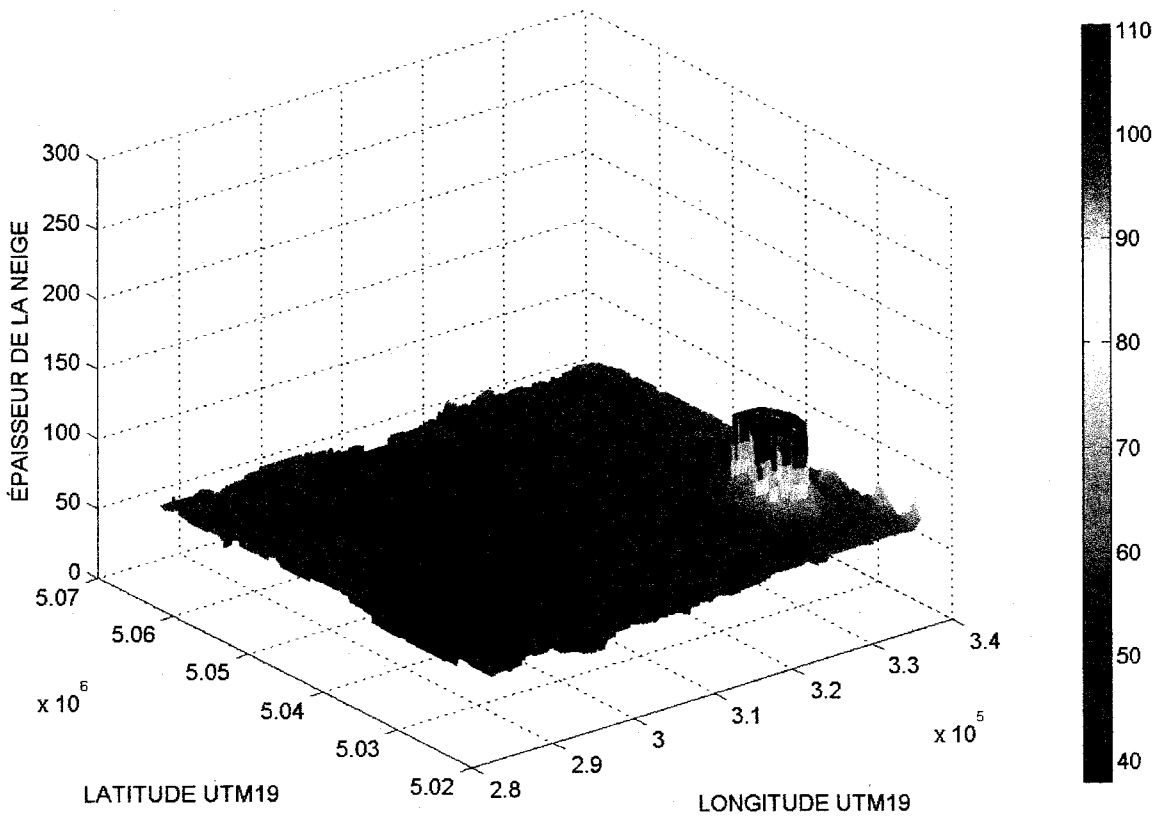
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 19 AVRIL 2008 (CM)



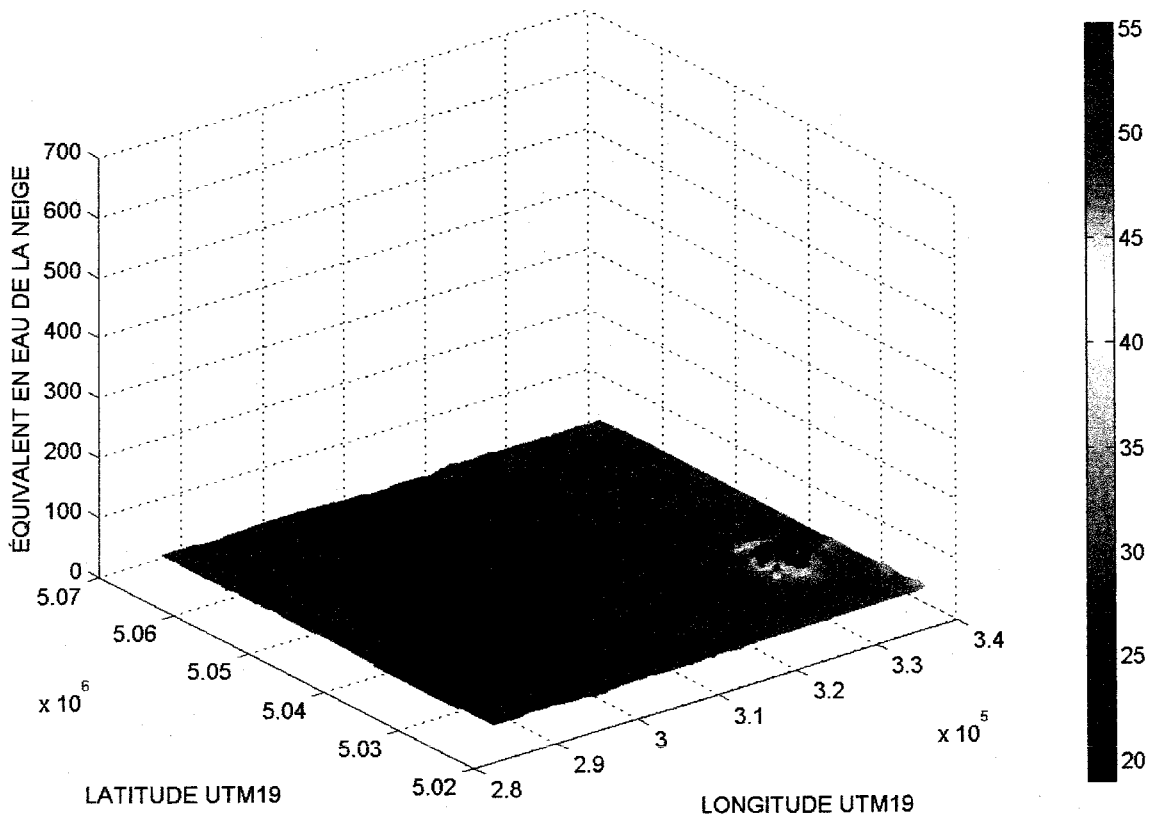
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 19 AVRIL 2008 (MM)



ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 26 AVRIL 2008 (CM)

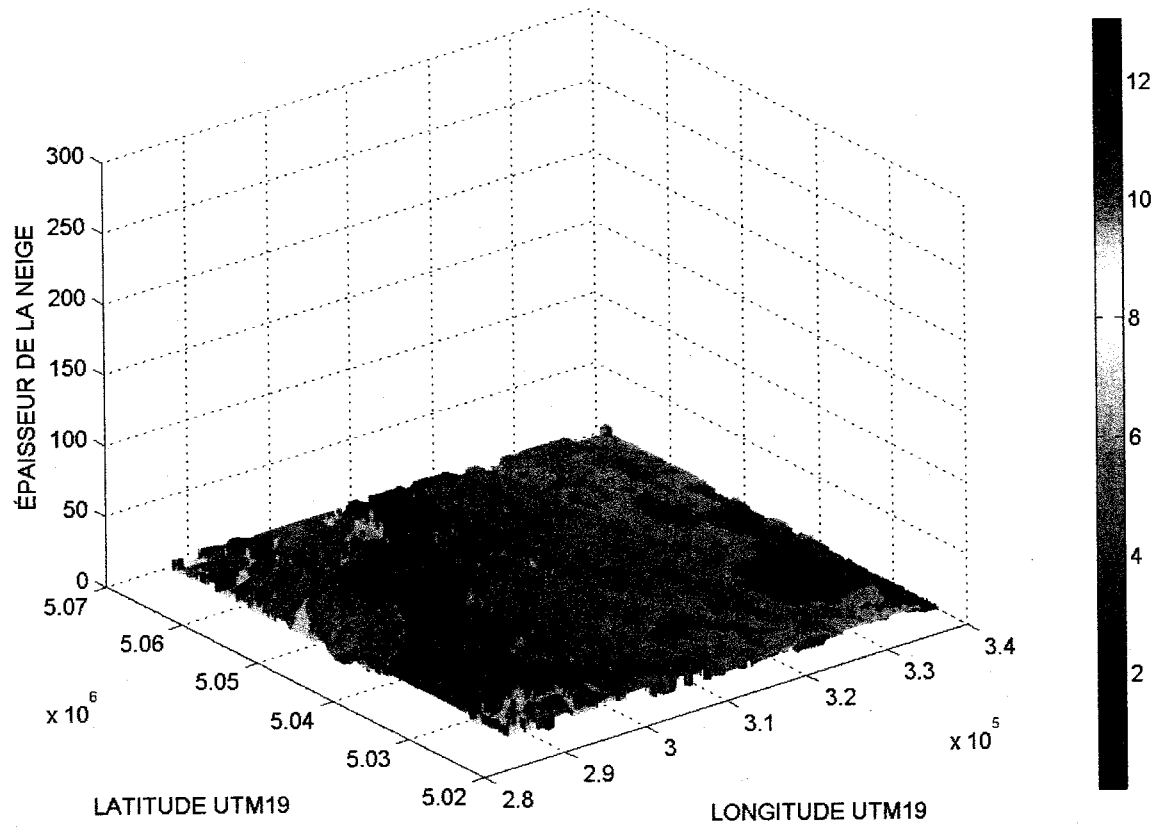


ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 26 AVRIL 2008 (MM)

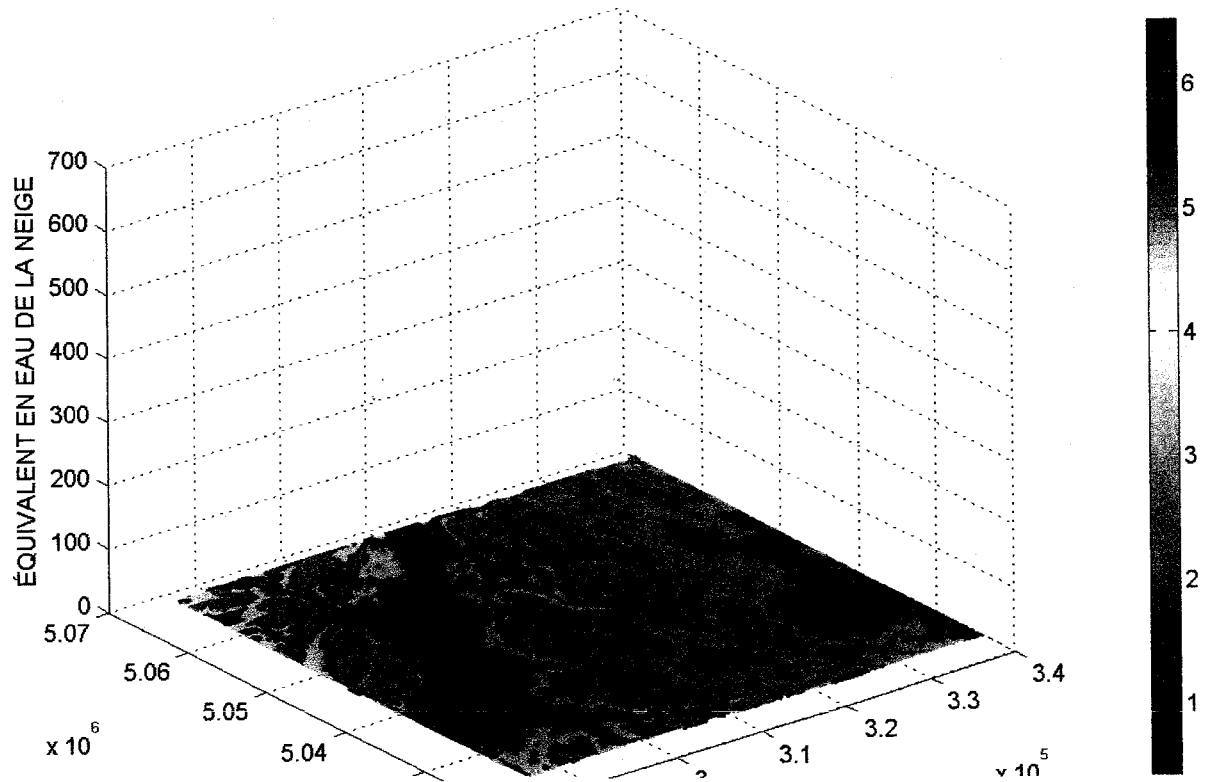




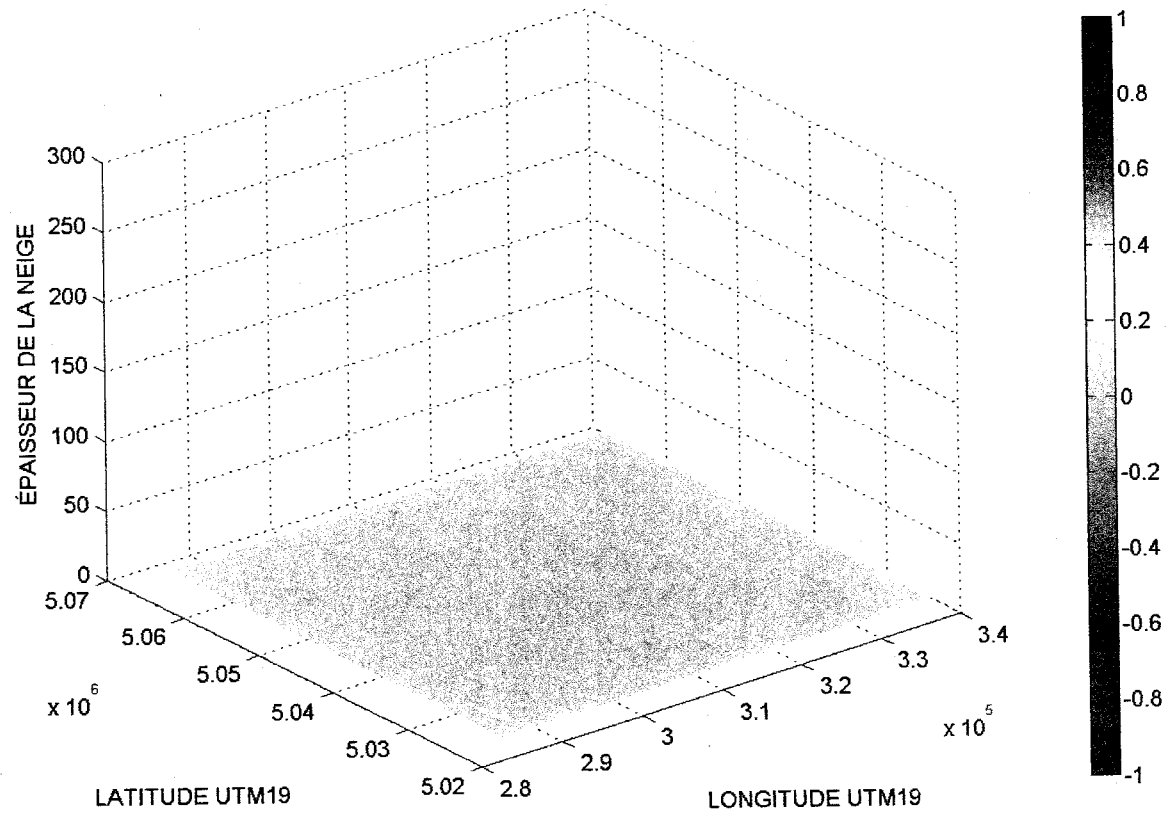
ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 3 MAI 2008 (CM)



ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 3 MAI 2008 (MM)



ÉPAISSEUR DE LA NEIGE 10 MAI 2008 (CM)



ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE 10 MAI 2008 (MM)

